

ESTUDO DA DISPERSÃO AXIAL

NUMA COLUNA DE

PRATOS ALTERNATIVOS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO : SISTEMAS DE PROCESSOS
QUÍMICOS E INFORMÁTICA

**Estudo da Dispersão Axial
numa Coluna de
Pratos Alternativos**

Autor : Roberto Rodrigues de Souza

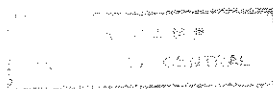
Orientador : Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi

Tese submetida à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Março - 1994

Campinas - São Paulo

Brasil



| | |
|--------------|-------------------------------------|
| UNIDADE | BC |
| N.º CHAMADA: | T/UNICAMP |
| | So 89E |
| V. E. | |
| IMP. DO B.V. | 24 842 |
| IMP. DO C. | 433/95 |
| C | <input type="checkbox"/> |
| D | <input type="checkbox"/> |
| X | <input checked="" type="checkbox"/> |
| PREÇO | R\$ 11,00 |
| DATA | 09/06/95 |
| N.º CPU | |

CM-00070693-9

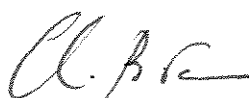
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL - UNICAMP

| | |
|-------|---|
| So89e | Souza, Roberto Rodrigues de |
| | Estudo da dispersão axial numa coluna de pratos alternativos / Roberto Rodrigues de Souza. - Campinas, [s.n.], 1994. |
| | Orientador : Elias Basile Tambourgi. |
| | Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. |
| | 1. Separação (Tecnologia). 2. Extração por solventes. 3. Extração (Química) - Equipamento e acessórios. I. Tambourgi, Elias Basile. |
| | II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título. |
| | 20. CDD -660.284 2 |
| | -660.284 248 |
| | -660.283 |

Índices para catálogo sistemático:


1. Separação (Tecnologia) 660.284 2
2. Extração por solventes 660.284 248
3. Extração (Química) - Equipamentos e acessórios 660.283

Esta versão corresponde a redação final da Tese de Mestrado, defendida pelo Engo. Roberto Rodrigues de Souza, e aprovada pela Comissão Julgadora em 25 de março de 1994.

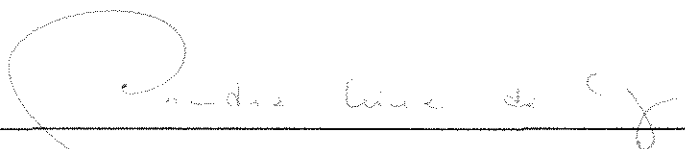


Profo. Dr. Elias Basile Tambourgi
(Orientador)

Tese defendida e aprovada, em 25 de março de 1994, pela
banca examinadora constituída pelos professores:



Profo. Dr. Elias Basile Tambourgi



Profa. Dra. Sandra Lucia da Cruz



Profa. Dra. Lucia Helena Innocentini Mei

Aos meus pais,

José Rodrigues de Souza

e

Araci de Souza Gouveia Rodrigues

Aos meus irmãos,

Ângela Raquel de Souza Marques

Rosângela Rodrigues de Souza

Jilton Rodrigues de Souza

e

Kelliton Rodrigues de Souza

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Elias Basile Tambourgi, pela orientação e apoio prestados durante a realização deste trabalho.

Aos amigos Luiz Mário Nelson de Gois e José Jailton Marques, pela contribuição dada durante a execução deste trabalho.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe, em especial a Arivaldo Montalvão Filho, José Pedro de Andrade Castor, Raymundo Nonato Vieira de Araujo e João Sampaio D'Avila, pelo incentivo dado a realização deste curso de pós-graduação.

Aos alunos de iniciação científica, pelo auxílio dado durante a execução deste trabalho.

A todos da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), em especial a área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Informática, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos os colegas que direta ou indiretamente tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao CNPq pela ajuda financeira concedida.

RESUMO

O estudo da dispersão axial em colunas de extração de pratos alternativos, ao contrário da coluna de extração de fluxo pulsado, ainda não foi bem caracterizado, dificultando, ou tornando impossível seu projeto eficiente e seguro em escala industrial.

Neste trabalho, apresentamos um estudo da influência de diversas variáveis operacionais e geométricas, as quais foram manipuladas experimentalmente, fornecendo subsídios para a obtenção de uma equação que descreva o comportamento do número de dispersão neste tipo de coluna de extração, em função das variáveis experimentais.

O fenômeno da dispersão axial é comum em colunas de extração mecanicamente agitadas. No presente trabalho pretendemos caracterizar este fenômeno, utilizando-se as equações proposta por Bischoff e Levenspiel (1962), para o modelo da dispersão. Com o intuito de quantificar experimentalmente o Coeficiente de Dispersão Axial, para que o mesmo possa ser comparado com aquele calculado através da correlação proposta.

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| Nomenclatura | VIII |
| Lista de Figuras | XI |
| Lista de Tabelas | XIII |
| Capítulo I - Introdução | 1 |
| Capítulo II - Análise da Literatura | 8 |
| Capítulo III - Procedimento Experimental | 24 |
| III.1 - Introdução | 25 |
| III.2 - Construção do Equipamento | 26 |
| III.3 - Princípio de Funcionamento do Equipamento | 30 |
| III.4 - Obtenção dos Dados Experimentais | 32 |
| III.5 - Variação Sistemática dos Parâmetros | 34 |
| III.6 - Método de Cálculo | 39 |
| Capítulo IV - Análise dos Resultados | 48 |
| IV.1 - Introdução | 49 |
| IV.2 - Avaliação do Efeito do Fluxo Reverso | 50 |
| IV.3 - Estudo da Influência dos Parâmetros Geométricos na Dispersão Axial | 56 |
| IV.3.1 - Influência do Espaçamento entre os Pratos na Dispersão Axial | 56 |
| IV.3.2 - Influência da Área Livre de Escoamento na Dispersão Axial | 58 |

| | |
|--|-----|
| IV.4 - Estudo da Influência das Variáveis Operacionais na Dispersão Axial | 63 |
| IV.4.1 - Influência da Vazão de Escoamento na Dispersão Axial | 63 |
| IV.4.2 - Influência da Frequência de Pulsação na Dispersão Axial | 64 |
| IV.4.3 - Influência da Amplitude de Pulsação na Dispersão Axial | 74 |
| IV.5 - Conclusão | 77 |
| Capítulo V - Modelagem Matemática | 79 |
| V.1 - Introdução | 80 |
| V.2 - Técnica da Análise Dimensional | 81 |
| V.3 - Aplicação da Teoria Pi de Buckingham ao Problema Físico para Determinação dos Grupos Adimensionais | 82 |
| V.4 - Determinação dos Coeficientes da Correlação | 88 |
| V.5 - Conclusão | 93 |
| Capítulo VI - Conclusões e Sugestões | 94 |
| Capítulo VII - Referências Bibliográficas | 100 |
| Apêndice A - Curvas de Calibração | A1 |
| Apêndice B - Resultados Obtidos | B1 |
| Apêndice C - Programas Desenvolvidos | C1 |
| Apêndice D - Obtenção da Correlação Genérica | D1 |

NOMENCLATURA

Letras Normais

- a - Amplitude de Pulsação (cm).
- A - Fração de Área Livre.
- C - Concentração do Traçador (g/ml).
- d - Diâmetro dos Furos (cm).
- D - Diâmetro da Coluna (cm).
- E - Coeficiente de Dispersão Axial (cm^2/s).
- f - Frequência de Pulsação (s^{-1}).
- F - Função Genérica.
- g - Aceleração da Gravidade (cm/s^2).
- h - Altura (cm).
- H - Altura da Coluna (cm).
- l - Distância entre o Ponto de Injeção e o de Amostragem (cm).
- L - Espaçamento entre os Pratos Perfurados (cm).
- n - Número Total de Estágios.
- P - Número de Péclet.
- q - Fração de Retorno para cada Estágio.
- Q - Vazão (ml/s).
- r - Velocidade do Rotor (s^{-1}).
- R - Número de Reynolds.
- S - Área da Seção Transversal da Coluna (cm^2).
- S_D - Área dos Discos Vibratórios (cm^2).
- S_P - Área dos Furos dos Pratos (cm^2).
- t - Tempo (s).
- T - Número de Transferência de Massa.

- u - Razão de Fluxo Reverso.
- v - Razão de Fluxo Volumétrico ($\text{ml}/\text{cm}^2.\text{s}$).
- V - Velocidade Superficial (cm/s).
- X - Coordenada na Direção Axial (cm).
- Z - Coordenada na Direção Axial (adimensional).
- Y - Constantes (que são função do fator de extração).
- W - Constantes Empíricas.
- Exp - Função Exponencial.

Índice Superior

- a, b, c - Constantes.
- m - Número de Dados Experimentais.

Índice Inferior

- A - Fase de Alimentação.
- c - Fase Contínua.
- d - Fase Dispersa.
- D - Defletores.
- E - Entrada.
- H - Transição.
- i - Fase Contínua ou Fase Dispersa.
- j - Índice do Somatório.
- K - Ponto Imediatamente Acima do Prato.
- K-1 - Ponto Imediatamente Abaixo do Prato.
- M - Médio.

- o - Inicial.
- P - Prato.
- R - Residência.
- S - Fase do Solvente.

Letras Gregas

- α - Função que Caracteriza a Hidrodinâmica do Fluxo no Estágio
- μ - Viscosidade (g/cm.s).
- ρ - Massa Específica (g/cm³).
- θ - Tempo Adimensional.
- π - Grupos Adimensionais.
- ε - Fração Retida.
- β - Número de Estágios Perfeitamente Misturados.
- σ - Variância.
- Δ - Variação.
- ϕ - Função Objetivo.
- ψ - Função que Depende do Tipo de Pulso do Traçador.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura I.01 - Extrator em Estágios Discretos | 3 |
| Figura I.02 - Extratores Diferenciais que Atuam sob Ação da Gravidade | 5 |
| Figura I.03 - Extratores Diferenciais Mecanicamente Agitados | 6 |
| Figura II.01 - Extrator de Fluxo Pulsado | 10 |
| Figura II.02 - Extrator de Pratos Alternativos | 11 |
| Figura III.01 - Aparelhagem Experimental | 27 |
| Figura III.02 - Curva de Calibração Posição do Flutuador versus Vazão de Água | 28 |
| Figura III.03 - Representação da Posição das Camadas do Fluido no Espaço entre os Pratos | 31 |
| Figura III.04 - Movimentação dos Pratos para Cima | 31 |
| Figura III.05 - Movimentação dos Pratos para Baixo | 31 |
| Figura III.06 - Curva de Calibração Transmitância versus Concentração da Solução de Alaranjado de Metila | 33 |
| Figura III.07 - Representação da Curva Gaussiana | 42 |
| Figura III.08 - Representação das Curvas Obtidas para um Recipiente Fechado | 44 |
| Figura IV.01 - Representação Gráfica do Grau de Mistura para o Escoamento Ideal | 51 |
| Figura IV.02 - Influência do Fluxo Reverso | 52 |
| Figura IV.03 - Concentração Adimensional vs o Tempo Médio de Residência Adimensional (para baixa velocidade de pulsação) | 54 |
| Figura IV.04 - Concentração Adimensional vs o Tempo Médio de Residência Adimensional (para elevada velocidade | |

| | |
|--|----|
| de pulsação) | 55 |
| Figura IV.05 - Coluna com Espaçamento entre os Pratos Igual a 17 cm | 57 |
| Figura IV.06 - Coluna com Espaçamento entre os Pratos Igual a 10 cm | 57 |
| Figura IV.07 - Disco com 20 % de Área Livre de Escoamento | 61 |
| Figura IV.08 - Disco com 38 % de Área Livre de Escoamento | 61 |
| Figura IV.09 - Número de Dispersão vs Vazão (para $L = 17$ cm, $A = 38$ %, $a = 6$ cm) | 65 |
| Figura IV.10 - Número de Dispersão vs Vazão (para $L = 17$ cm, $A = 38$ %, $a = 8$ cm) | 66 |
| Figura IV.11 - Número de Dispersão vs Vazão (para $L = 17$ cm, $A = 20$ %, $a = 8$ cm) | 67 |
| Figura IV.12 - Número de Dispersão vs Vazão (para $L = 10$ cm, $A = 20$ %, $a = 6$ cm) | 68 |
| Figura IV.13 - Número de Dispersão vs Frequência (para $L = 17$ cm, $A = 20$ %, $a = 4$ cm) | 70 |
| Figura IV.14 - Número de Dispersão vs Frequência (para $L = 10$ cm, $A = 20$ %, $a = 4$ cm) | 71 |
| Figura IV.15 - Número de Dispersão vs Frequência (para $L = 10$ cm, $A = 20$ %, $a = 6$ cm) | 72 |
| Figura IV.16 - Número de Dispersão vs Frequência (para $L = 10$ cm, $A = 20$ %, $a = 8$ cm) | 73 |
| Figura IV.17 - Número de Dispersão vs Amplitude (para $L = 10$ cm, $A = 20$ %, $Q = 6,83$ mL/s) | 75 |
| Figura IV.18 - Número de Dispersão vs Amplitude (para $L = 10$ cm, $A = 20$ %, $Q = 10,0$ mL/s) | 76 |
| Figura V.01 - Correlação Proposta para Cálculo do Número de Dispersão | 92 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela III.01 - Variação Sistemática dos Parâmetros Experimentais | 35 |
| Tabela IV.01 - Influência do Espaçamento entre os Pratos no Número de Dispersão (para área livre igual a 20 %) | 59 |
| Tabela IV.02 - Influência da Área Livre de Escoamento no Número de Dispersão (para espaçamento igual a 17 cm) | 62 |
| Tabela V.01 - Listagem dos Parâmetros Físicos com seus Símbolos e Dimensões Fundamentais Correspondentes | 83 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A extração líquido-líquido também denominada extração por solvente, é uma operação unitária utilizada para fracionar uma mistura líquida pelo contato com um segundo solvente líquido. Nos últimos anos este processo de separação tem se tornado cada vez mais importante na Engenharia Química, principalmente quando se deseja efetuar uma dada separação em escala industrial.

No processo de extração, ocorre a transferência de um componente de uma fase para outra, a qual é influenciada por diversos fatores, tais como, a retenção da fase dispersa ("holdup"), a dispersão axial, velocidade de escoamento das fases, entre outros.

No caso ideal, apenas o componente a ser extraído é solúvel no solvente, enquanto que os demais componentes não o são. Na prática, todos os componentes são parcialmente solúveis no solvente.

Para que o processo de extração seja possível, é necessário que a solubilidade no solvente do componente que se deseja extrair seja bem maior que as dos demais constituintes. Uma vez que o processo de extração geralmente tem por finalidade a recuperação de um determinado elemento de valor comercial, ou mesmo quando ele atua como um contaminante numa dada corrente do processo.

A eficiência de extração depende de diversos fatores, que são as variáveis de operação, os parâmetros geométricos e as características físico-químicas do sistema.

Com os recentes estudos, cada vez mais objetivando o aperfeiçoamento do processo de extração, têm surgido diversos novos tipos de extratores. Os extratores utilizados na separação de misturas líquidas são classificados em extratores com estágios discretos e extratores diferenciais, de acordo com a construção do equipamento.

Os extratores com estágios discretos, são constituídos por uma série de estágios interconectados, como mostra a Figura I.01.

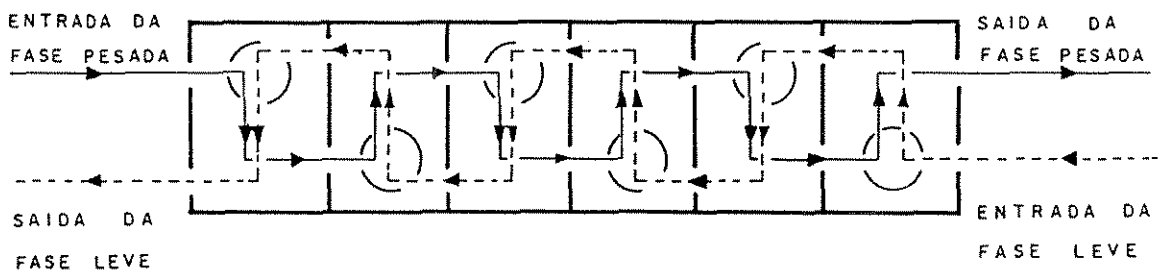


FIGURA I-01 - EXTRATOR EM ESTÁGIOS DISCRETOS.

Nestes extratores as fases permanecem em contato até que se aproximem do equilíbrio, sendo posteriormente separadas antes de passar para o próximo estágio. A grande desvantagem deste tipo de extrator é a necessidade de se utilizar equipamentos de grandes volumes, impossibilitando seu uso para vazões de fluidos muito elevadas.

Os extratores diferenciais são equipamentos dotados de um mecanismo que proporciona um aumento na transferência do soluto para o solvente, sendo a operação realizada com a eficiência desejada em um menor período de tempo. Estes apresentam menor volume que os extratores em estágios discretos, sendo classificados em extratores que atuam sob ação da gravidade e extratores mecanicamente agitados, representados nas Figuras I.02 e I.03 respectivamente.

Os extratores que operam sob ação da gravidade possuem baixo custo de operação e de manutenção, no entanto, as eficiências de extração são relativamente baixas.

Nos extratores mecanicamente agitados, a introdução de um mecanismo de agitação, provoca um aumento na transferência de massa, e, conseqüentemente, um aumento na eficiência de extração.

As colunas de extração são geralmente projetadas em escala industrial, com base na definição de parâmetros determinados experimentalmente ("scale-up") utilizando-se preferencialmente o mesmo sistema líquido. Um dos fatores que tem sido largamente investigado nestes tipos de equipamentos, devido à sua grande importância na eficiência de extração, é a dispersão axial, caracterizada pelo comportamento não-ideal do escoamento. Este fenômeno é referido na literatura sob várias denominações, tais como, mistura axial, mistura longitudinal, dispersão longitudinal e dispersão axial.

Neste trabalho, pretende-se obter uma correlação empírica que permita o cálculo do coeficiente de dispersão axial para uma coluna de

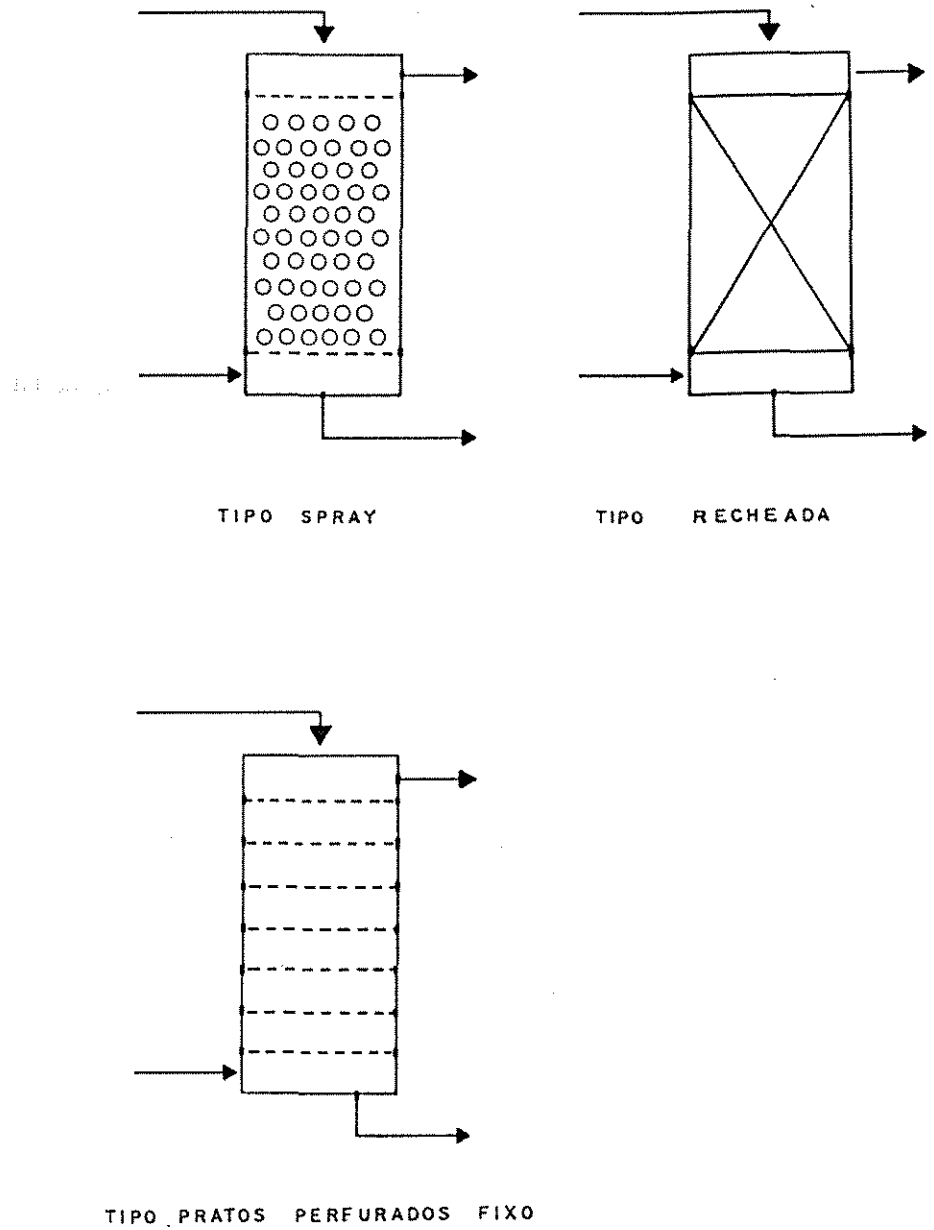
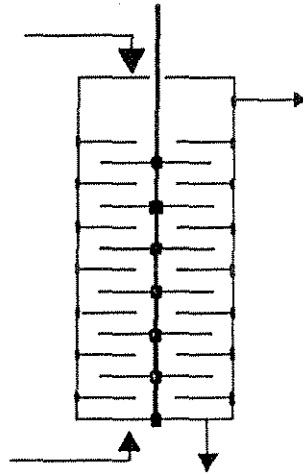
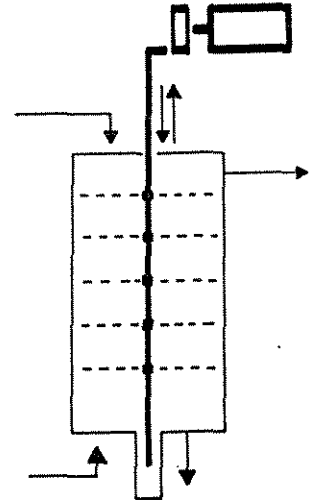


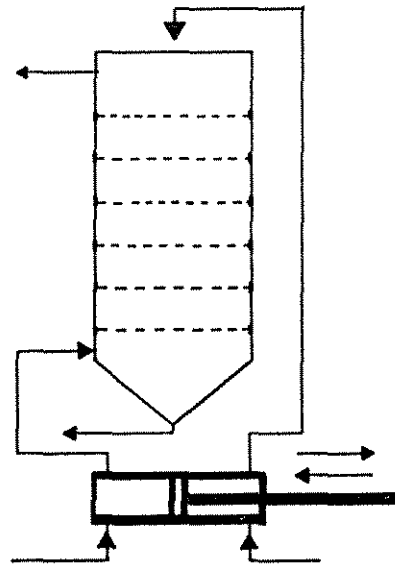
FIGURA I-02 - EXTRATORES DIFERENCIAIS QUE ATUAM SOB AÇÃO DA GRAVIDADE



COLUNA DE DISCOS ROTATIVOS



COLUNA DE PRATOS ALTERNATIVOS



COLUNA DE FLUXO PULSADO

FIGURA I-03 - EXTRATORES DIFERENCIAIS MECANICAMENTE AGITADOS.

extração de pratos alternativos, utilizando-se a técnica da análise dimensional. A grande importância da caracterização deste fenômeno está na possibilidade de se projetar um equipamento de extração com maior confiabilidade, permitindo-se saber qual a taxa de transferência de massa que realmente ocorre na coluna.

Com este propósito, no Capítulo II teremos um breve estudo sobre o atual desenvolvimento das pesquisas realizadas no campo da extração líquido-líquido, para diversos tipos de colunas de extração, em especial para as de pratos alternativos e de fluxo pulsado.

No Capítulo III, descrevemos o procedimento utilizado para a construção do equipamento, o princípio de funcionamento, a metodologia adotada para a obtenção dos dados experimentais e a combinação dos parâmetros estudados, possibilitando a identificação do coeficiente de dispersão axial. Além disso, também é feita uma descrição do método de cálculo, que será utilizado para caracterizar o fenômeno da dispersão, com base nos dados experimentais da concentração em função do tempo de residência.

No Capítulo IV, apresentamos uma avaliação do efeito do fluxo reverso, a análise dos parâmetros geométricos e das variáveis operacionais, em função das diversas situações experimentais estudadas, permitindo uma caracterização mais realística do coeficiente de dispersão axial.

No Capítulo V, relatamos o procedimento utilizado na obtenção da correlação que determina o valor do coeficiente de dispersão axial, possibilitando uma predição deste fenômeno. A inclusão deste parâmetro no projeto do equipamento confere uma maior fidedignidade ao mesmo.

Finalizando este trabalho, temos o Capítulo VI, onde são apresentadas as diversas conclusões obtidas neste estudo, bem como algumas sugestões para estudos posteriores.

CAPÍTULO II

ANÁLISE DA LITERATURA

As colunas de extração de pratos perfurados fixo com fluxo pulsado e as colunas de extração de pratos alternativos, também conhecidas como extratores de fluxo pulsado e extratores de pratos alternativos, respectivamente, foram descritos inicialmente por Van Dijck (1935). Os dois tipos de colunas foram projetadas para sistemas líquido-líquido, com escoamento em contracorrente, como mostra as Figuras II.01 e II.02. O sistema de agitação por pulsação aumenta sensivelmente o contato entre as duas correntes líquidas, favorecendo assim a eficiência de extração.

Na Figura II.01 os pratos perfurados são fixos no interior da coluna e a corrente de líquido flui através dos mesmos. Nesta construção a alimentação é feita pelo topo e pelo fundo da coluna, sendo a fase leve bombeada alternativamente, fazendo com que haja uma pulsação da massa líquida dentro da coluna. Os resultados deste movimento, segundo Van Dijck (1935), são semelhantes aos obtidos na coluna de pratos alternativos, como será descrito posteriormente. O uso das colunas de fluxo pulsado não é aconselhável quando a quantidade de líquido a ser processada é muito grande, pois necessita de uma elevada quantidade de energia para mover a grande massa de fluido. Porém, a maioria dos trabalhos publicados reportam mais especificamente este tipo de coluna. Isto deve-se ao fato de que estas são mais fáceis de serem montadas, apesar de terem um custo mais elevado.

Na Figura II.02 temos a representação de uma coluna de extração de pratos alternativos, na qual os pratos movimentam-se para cima e para baixo, por meio de um mecanismo pulsante. É compreendido que os pratos perfurados podem ser conectados, por meio de um eixo central móvel ao invés de correntes, sendo o movimento do sistema proporcionado por um motor ou qualquer outro mecanismo adequado. Este tipo de extrator ainda não foi bem detalhado, devido às dificuldades associadas à montagem, apesar desta ser de baixo custo, comparado com os extratores

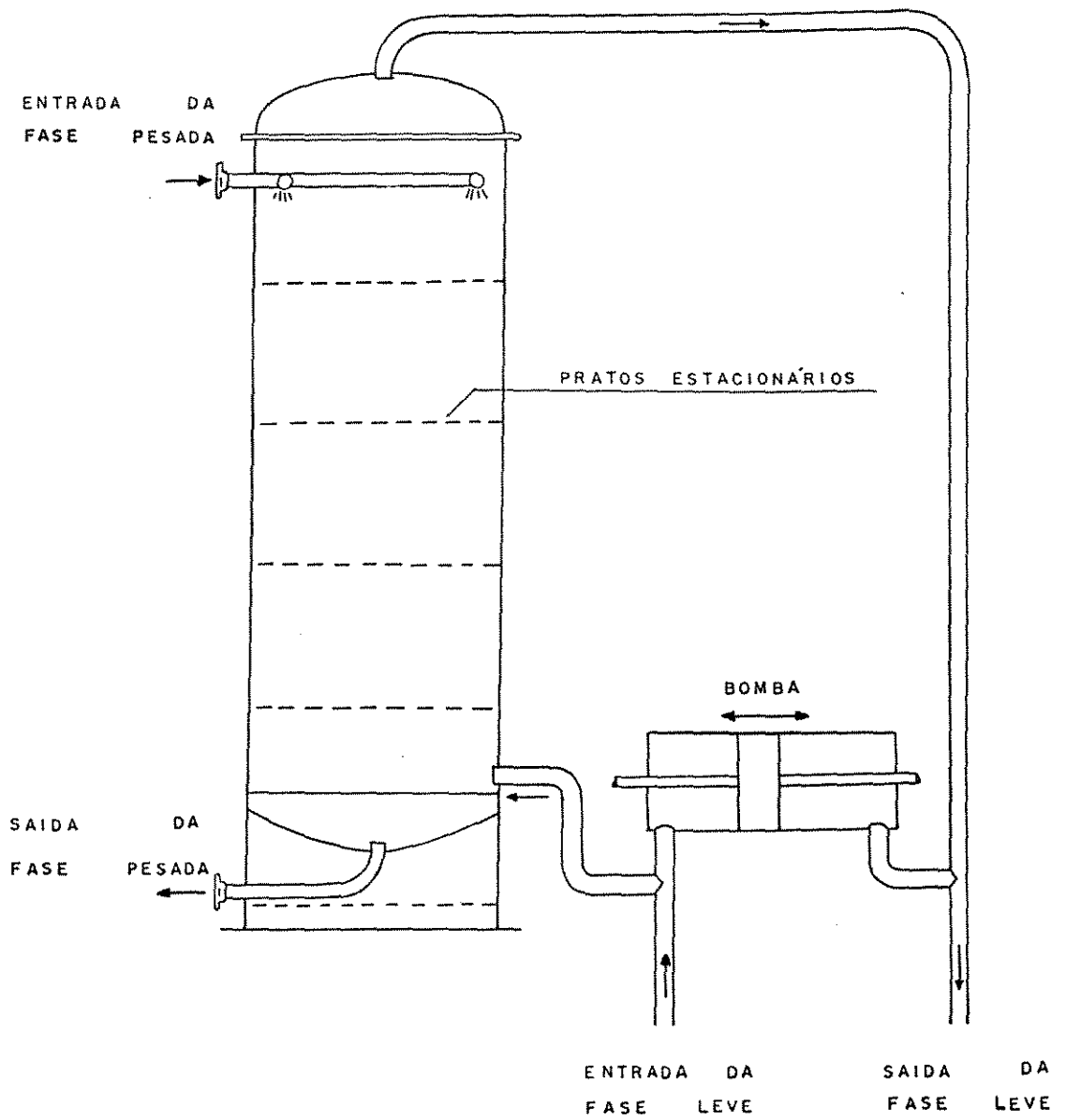


FIGURA II - 01 - EXTRATOR DE FLUXO PULSADO.

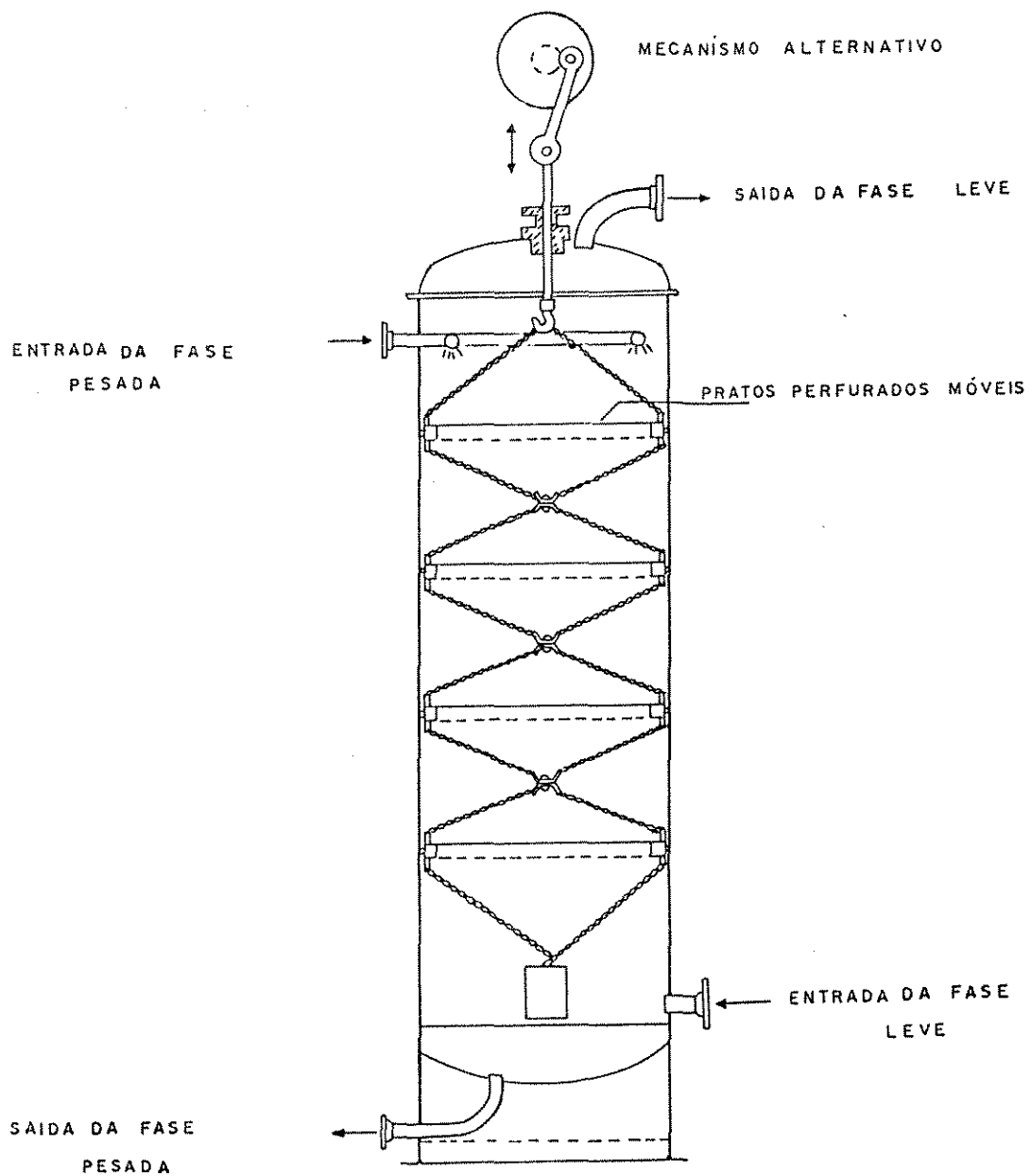


FIGURA II - 02 - EXTRATOR DE PRATOS ALTERNATIVOS.

de fluxo pulsado.

Sleicher (1959), estudou a influência da mistura axial na eficiência de extração, num extrator de fluxo pulsado, considerando-o como uma coluna diferencial. As condições de operação apresentadas neste trabalho são válidas para extratores com alimentação contínua e fluxo em contra corrente. Para realizar este estudo ele considerou o fluxo reverso de cada fase constante, sendo observado que este fenômeno favorecia a dispersão axial; a velocidade e a concentração média de cada fase foram também considerados constantes em todo o estágio; o solvente e o soluto foram supostamente imicíveis, com coeficiente de distribuição constante, ou seja, não é função da concentração; o produto do coeficiente de transferência de massa e a área interfacial por unidade de volume do extrator foi considerada constante, supondo-se também que o gradiente de concentração do soluto em cada fase não sofre variação.

Na realidade, a mistura axial da fase contínua na coluna de extração é o resultado do efeito da turbulência e da difusão molecular na direção axial. Este autor apresenta uma correlação empírica para o coeficiente de dispersão axial da seguinte forma:

$$E_c = \frac{P_A P_S}{P_A P_S + T \left[Y_1 P_A + Y_2 P_S + Y_3 \sqrt{P_A P_S} - Y_4 \sqrt{P_A P_S} + Y_5 (P_A - P_S) \exp(Y_6 T) \right]} \quad (\text{II.1})$$

A desvantagem apresentada por esta equação está basicamente na dependência existente no cálculo do coeficiente de dispersão axial para com o número de transferência de massa e o fator de extração, os quais nem sempre são de fácil determinação, pois os mesmos são influenciados pela dispersão axial.

Em operações de fluxo contínuo, os extratores apresentam o fenômeno da dispersão axial, tornando-se muitas vezes difícil determinar o

desempenho do equipamento. Miyauchi e Vermeulen (1963a), desenvolveram soluções matemáticas para a predição do fenômeno da dispersão axial acompanhada da transferência de massa, obtidas a partir do modelo da dispersão, assumindo um coeficiente de dispersão axial e uma velocidade média para cada fase.

Os efeitos da mistura axial em extratores de fluxo pulsado, operando em contracorrente, foram descritos por Miyauchi e Vermeulen (1963b), utilizando o modelo do fluxo reverso. Este modelo assume a coluna como sendo uma série de estágios perfeitamente misturados, onde os valores do coeficiente de dispersão axial é determinado a partir de balanços de massa nos vários compartimentos do equipamento.

A equação por eles obtida, para a operação em regime de emulsão - caracterizado por alta frequência de pulsação, pequenas gotas da fase dispersa e uma alta retenção - foi a seguinte:

$$\frac{E_i}{a f \varepsilon_i H} = \frac{\frac{v}{a f \varepsilon_i}}{2 \beta - \left(\frac{1}{n}\right)} + \frac{1}{\beta} \quad (\text{II.2})$$

Para a coluna operando em regime de mistura-decantação ("mixer-settler") ideal - caracterizado por baixa frequência de pulsação, baixa retenção e separação das fases em cada estágio, ao fim de cada meio ciclo de pulsação - eles mostraram que, neste caso, o número de estágios perfeitamente misturados não é considerado, resultando na seguinte equação:

$$\frac{E_i}{a f \varepsilon_i H} = \frac{\frac{v}{a f \varepsilon_i}}{2 \beta - \left(\frac{1}{n}\right)} \quad (\text{II.3})$$

Miyauchi e Vermeulen (1963b) utilizaram os dados experimentais obtidos por outros autores, com o objetivo de se determinar o valor do número de estágios perfeitamente misturados (β) na coluna, o qual representa fisicamente à instabilidade do movimento do líquido num dado estágio. Eles obtiveram para a operação em regime de emulsão $\beta = 2$ e para operação em regime de mistura-decantação $\beta = 1$.

Miyauchi e Oya (1964) calcularam o coeficiente de dispersão axial através da equação II.2, descrita por Miyauchi e Vermeulen (1963b), sendo o cálculo do número de estágios perfeitamente misturados determinado pela equação empírica, válida para coluna de fluxo pulsado com escoamento monofásico em regime de emulsão, descrita a seguir:

$$\beta = 0,57 \frac{(D_E^3 H)^{3/5}}{\frac{D_P}{A}} \quad (\text{II.4})$$

Esta equação torna o estudo realizado anteriormente por Miyauchi e Vermeulen (1963b) mais completo, em particular para o regime de emulsão (equação II.2). Mesmo assim, as equações apresentadas por estes autores são para extratores de fluxo pulsado, o qual difere da coluna a ser estudada no presente trabalho.

Sehmel e Babb (1964) desenvolveram duas correlações empíricas para as colunas de fluxo pulsado, usando a técnica dos mínimos quadrados para o cálculo do coeficiente de dispersão axial, de acordo com o regime de operação da coluna. A primeira foi obtida para a coluna operando no regime de mistura-decantação, assumindo a seguinte forma:

$$E = 1,398 \cdot 10^3 - 1,387 \cdot 10^{-8} v_c (f - f_H)^2 + 3,967 \Delta\rho \quad (\text{II.5})$$

Para a segunda equação o tipo de operação considerado foi o regime de emulsão, expressa por:

$$E = 2,331.10^3 - 8,172.10^{-11} V_c^3 (f - f_H)^2 + 3,479 \Delta \rho - 4,078.10^3 a + 5,373.10^3 a^2 \quad (\text{II.6})$$

Neste trabalho Sehmel e Babb (1964), observaram uma completa dependência funcional da mistura axial com as variáveis operacionais, de acordo com o tipo de operação da coluna, bem como da frequência de transição (f_H), que é obtida a partir de estudos da fração de retenção da fase dispersa em colunas do mesmo tipo. Nestas correlações observa-se que não são levadas em conta os parâmetros geométricos, que são de grande importância para o projeto e operação da coluna de extração.

As relações desenvolvidas por Novotny, Prochazka e Landau (1970), são válidas para colunas de extração de fluxo pulsado, com operação em única fase e coleta das amostras em vários pontos. Segundo estes autores a relação da concentração do traçador imediatamente acima e abaixo de cada prato num dado estágio com a razão de fluxo reverso, é dada através da seguinte equação:

$$\frac{C_k}{C_{k-1}} = \frac{1 + q}{q} \quad (\text{II.7})$$

Desta forma a mistura axial num dado estágio é expressa por meio da equação do transporte de massa no regime estacionário, assumindo que os estágios estejam perfeitamente misturados na direção radial, escrita da seguinte forma:

$$E \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + V \frac{\partial C}{\partial X} = 0 \quad (\text{II.8})$$

A solução desta equação utilizando as condições de contorno apropriadas, resulta na expressão:

$$\alpha = \frac{C_k}{C_{k-1}} = \text{Exp}\left(\frac{V L}{E}\right) \quad (\text{II.9})$$

A equação II.9 não demonstra ser uma correlação adequada quando se deseja fazer projetos em grande escala, uma vez que esta considera apenas um parâmetro geométrico e uma variável de operação, tornando muito arriscada a determinação de valores do coeficiente de dispersão axial nas colunas de pratos alternativos, através desta equação.

A mistura axial em uma coluna de disco vibratório multiestágio (MVDC), foi estudada por Tojo, Miyanami e Yano (1976). Este contactor líquido-líquido é constituído por diversos estágios separados por pratos circulares, sendo que no interior de cada um destes estágios a massa líquida é agitada por discos vibratórios interligados por uma haste central, os quais realizam um movimento alternativo (semelhante ao da coluna em estudo).

A correlação proposta por estes autores, tem como base a equação II.10, apresentada por Miyauchi et. al.(1964), escrita da seguinte forma:

$$\frac{1}{P_c} = \frac{E_c}{V_c H} = \frac{1}{2\beta - \left(\frac{1}{n}\right)} + \frac{u}{\beta} \quad (\text{II.10})$$

Sabendo-se que a razão de fluxo reverso (u) é calculada pela equação

proposta por Novotny et. al.(1970) . Tojo, Miyanami e Yano (1976) apresentaram a seguinte equação:

$$\frac{E_c}{V_c H} = 0,258 + \frac{1}{2} \left[- \frac{\psi}{3,14} + \frac{2 a f (1 - \epsilon_d)}{V_c} \text{sen} \frac{S_p}{S} \right] \frac{S_D}{S} \quad (\text{II.11})$$

Os dados experimentais calculados via o Modelo da Dispersão foram comparados com os obtidos com base na equação II.11, mostrando uma boa aproximação. A principal desvantagem apresentada por esta equação está na dependência do cálculo da dispersão axial com a fração de retenção da fase dispersa ("holdup").

Kim e Baird (1976) estenderam a técnica da reação química para o caso onde um único pulso de um dos reagentes é injetado na corrente do outro reagente, sendo a reação considerada instantânea. Cada resultado da dispersão axial foi expresso em termos do modelo da dispersão ou do modelo de estágio de mistura. A coluna por eles utilizadas era dividida em compartimentos com espaçamento regulares entre os pratos. Foi constatado que o modelo da dispersão foi o mais apropriado para o estudo da dispersão axial no extrator de pratos alternativos. Os resultados da operação em única fase foram obtidos correlacionando-se, alternativamente o coeficiente de dispersão axial, com a amplitude, com a frequência, e com o espaçamento entre os pratos.

Os dados obtidos experimentalmente para uma coluna de extração de pratos alternativos de teflon, operando em única fase, foram correlacionados por regressão linear, obtendo-se:

$$E = 1,98 a^{1,79} f^{0,96} \mu^{0,078} l^{-0,67} \quad (\text{II.12})$$

Nesta correlação a influência da viscosidade com relação aos demais

parâmetros estudados é muito pequena, podendo ser desprezada. Esta simplificação após um novo correlacionamento das variáveis resultou na seguinte expressão:

$$E = 1,98 a^{1,74} f^{0,96} l^{-0,69} \quad (\text{II.13})$$

Kim e Baird (1976) obtiveram outra correlação através de um estudo idêntico ao anterior, utilizando pratos construídos de aço inoxidável, mantendo os demais parâmetros experimentais inalterados, cuja expressão obtida será escrita da seguinte forma:

$$E = 5,56 a^{1,77} f^{1,00} l^{-1,32} \quad (\text{II.14})$$

Esta correlação apresenta um maior erro devido à quantidade de dados utilizados ser bem menor que na anterior. O método analítico utilizado por esses autores, baseou-se nos dados experimentais para determinar o valor das constantes, de acordo com a influência de cada parâmetro.

As correlações II.13 e II.14 apresentam pequenas diferenças relativas à influência dos fatores associados com o tipo de prato, sendo que o termo multiplicativo sofreu maior modificação. Nestas correlações não foram levadas em conta diversas variáveis de operação e geométricas, que são de grande importância na caracterização do fenômeno da dispersão axial.

Hafez, Kim e Nirdosh (1979), estudaram a influência do diâmetro na mistura axial da fase contínua em uma coluna de pratos pulsantes por dois métodos diferentes. O primeiro, também utilizado por Kim e Baird (1976), consiste na observação visual, ou seja, na técnica da reação química ácido-base instantânea. Eles observaram que, para baixos valores da velocidade de pulsação (produto da amplitude pela frequência), a observação visual torna-

se falha, prejudicando a determinação do coeficiente de dispersão axial. Segundo estes autores, isto se deve a existência de correntes circulatorias. O segundo método, consiste na injeção de um pulso convencional de um sal (como traçador), sendo a resposta medida indiretamente através da condutividade em tomadas de amostra situadas à jusante do ponto de injeção. Esta técnica é a mais adequada para colunas com grande diâmetro e baixa intensidade de agitação.

Estes observaram que os valores deste coeficiente é uma função do diâmetro da coluna. Porém, os dados experimentais obtidos por eles foram comparados com os resultados fornecidos pela equação II.12, obtida por Kim e Baird (1976) para as condições de operação efetuada.

No estudo realizado por Yong-Ho e Kim (1987) foram observados os efeitos da geometria dos pratos, da razão de fluxo da fase contínua e dispersa, da amplitude e frequência de pulsação, sobre a dispersão axial na fase contínua.

Para pratos com geometria semelhante a defletores, eles constataram uma redução no valor do coeficiente de dispersão axial, em comparação com a média para outros tipos de pratos, indicando um aumento na mistura radial e, em contrapartida, um decréscimo da não uniformidade transversal do perfil de velocidade. A correlação por eles obtida foi a seguinte:

$$E = 3,26 + \left\{ \left[2,24 - 0,05 \left(1 - \frac{L}{2 L_D} \right) \left(1 + \frac{L}{2 L_D} \right) \right]^{2,27} \right\} a^2 f \quad (\text{II.15})$$

Esta equação foi obtida com base nos dados experimentais, analisando-se a fração de área livre nas regiões dos defletores, em função da amplitude e frequência de pulsação. Neste trabalho, não foi avaliada a influência da velocidade da fase contínua, do número de pratos, e de outros parâmetros de

natureza geométrica e operacional.

Steiner, Kumar e Hartland (1988) estudaram a mistura axial, numa planta-piloto com uma coluna de extração líquido-líquido agitada do tipo Kuhni.

Para determinar e expressar os parâmetros da mistura axial, foi dada preferência ao modelo diferencial, que é bem mais simples e apresenta resultados idênticos aos obtidos por outros modelos. As determinações foram feitas através de experimentos com traçador, possibilitando a construção de perfis de concentração em função do tempo de residência.

Os dados coletados foram correlacionados na seguinte equação:

$$E_c = 6,482 \cdot 10^{-9} V_{oc}^{0,14} V_{od}^{-0,22} F^{0,94} \varepsilon^{-0,1} (1 - \varepsilon)^{0,95} A^{0,65} \quad (\text{II.16})$$

Nesta equação, podemos notar apenas a influência de um parâmetro geométrico e de dois operacionais. Sendo que sua principal desvantagem está na dependência da determinação do coeficiente de dispersão axial para com a retenção da fase dispersa ("holdup"), a qual, por sua vez, depende do grau de mistura axial no interior da coluna.

Matsumoto, Honma e Koga (1989), realizaram estudos numa coluna de fluxo pulsado com a finalidade de obter dados de fundamental importância para o projeto deste tipo de equipamento em escala industrial. O perfil de concentração do traçador, obtido na corrente da fase dispersa ao longo da coluna, possibilitou a determinação do coeficiente de dispersão axial. Este perfil de concentração foi determinado com base no modelo da difusão unidimensional estacionário, expresso da seguinte forma:

$$E \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + v \frac{\partial C}{\partial X} = 0 \quad (\text{II.17})$$

A solução desta equação é dada por:

$$C_{(x)} = C_0 - \left[\frac{dC}{dX} \right]_{x=0} \frac{E}{V} \left[1 - \exp\left(\frac{E}{V^2}\right) \right] \quad (\text{II.18})$$

O efeito do produto da amplitude pela frequência foi utilizado neste trabalho, para avaliar o comportamento da velocidade superficial sobre o coeficiente de dispersão axial, através de uma análise gráfica, tendo como parâmetro das curvas a velocidade de pulsação. Portanto, eles observaram que a velocidade superficial é um fator apropriado na determinação do comportamento físico na coluna de extração estudada.

Prvcic, Pratt e Stevens (1989) também estudaram o comportamento do coeficiente de mistura da fase contínua, determinando-o através da injeção do traçador em colunas de extração de fluxo pulsado. Eles observaram que, em operações com única fase, o coeficiente aumenta com o diâmetro da coluna, tornando-se independente deste, no caso da operação com escoamento bifásico.

Tung e Lueche in Prvcic et al. (1989), correlacionaram dados experimentais publicados na literatura, para obter uma equação generalizada para a predição do valor do coeficiente de dispersão axial para escoamento bifásico, em regime de emulsão, dada por:

$$E_c = 0,250 \left(\frac{L V}{A^{1,30}} \right) \left(\frac{d}{L} \right)^{0,565} \left(\frac{a f}{V} \right)^{0,605} \quad (\text{II.19})$$

Utilizando a água como fase contínua, eles observaram que o diâmetro da coluna não apresentava um efeito significativo. Esta equação apresenta um bom número de variáveis experimentais para a caracterização da dispersão axial, sendo que sua principal limitação está no tipo de coluna utilizada

(fluxo pulsado), que é diferente da estudada no presente trabalho.

O estudo da dispersão axial em uma coluna de extração tipo Kuhni, para escoamento monofásico foi realizado por Dongaonkar, Pratt e Stevens (1991). A técnica para injeção do traçador utilizada para obtenção dos resultados experimentais foi a do pulso instantâneo (semelhante ao utilizado no presente trabalho), o qual representa a medida do perfil de concentração do traçador em função do tempo de residência.

Correlacionando-se os dados experimentais e as condições operacionais, através da análise dimensional, estes autores obtiveram a seguinte correlação:

$$\frac{E_c}{V_c H} = 0,154 + 0,63 \left(\frac{r d_p}{V} \right) \left(\frac{h_D}{d_D} \right)^{0,067} \left(\frac{d_D}{D} \right)^{0,587} \quad (\text{II.20})$$

Esta equação apresenta-se bastante satisfatória, para descrever o fenômeno da dispersão axial em colunas deste tipo, uma vez que o erro é de mais ou menos 20 %. Esta correlação tem sido muitas vezes usada para avaliar o efeito da mistura axial da fase dispersa, tornando a respectiva avaliação não realista.

Um recente estudo da dispersão axial em uma coluna de extração de pratos perfurados vibratórios foi realizado por Baird, Rama Rao e Vijayan (1992). Neste trabalho os pratos da coluna são conectados uns aos outros por meio de um eixo, de modo que a posição dos mesmos é igual para pratos alternados.

O coeficiente de dispersão axial neste trabalho para a fase contínua foi medida por estes autores, pela injeção de um pulso de traçador (cloreto de sódio) próximo do ponto de alimentação. A variação da concentração foi utilizada para calcular o número de dispersão com base no Modelo da Dispersão, proposto por Levenspiel e Smith (1957).

Esse trabalho não apresentou nenhuma equação empírica que descrevesse o fenômeno da dispersão, no entanto, sua grande importância está no tipo de experimento realizado para a obtenção dos dados, objetivando a caracterização experimental da dispersão axial, através da técnica de injeção do traçador tipo pulso-resposta e do Modelo da Dispersão que é simples, mas oferece bons resultados quando comparado com os outros.

As principais correlações apresentadas até o momento, para a predição do coeficiente de dispersão axial da fase contínua em coluna de extração de pratos alternativos, são de uso um tanto limitado. No presente trabalho, pretende-se obter uma correlação mais completa, baseando-se na operação em única fase, utilizando-se uma maior variação de parâmetros. Com isto, visa-se dar mais subsídios para trabalhos futuros, ligados ao projeto e operação de colunas de extração deste tipo.

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

III.1 - INTRODUÇÃO

Com o objetivo de caracterizar a dispersão axial que ocorre nas colunas de extração de pratos alternativos, foi proposta a construção de uma coluna, em escala laboratorial, a qual nos permitiu realizar um estudo experimental sobre sua hidrodinâmica.

Nos capítulos anteriores fizemos um breve comentário sobre o processo de extração e os desenvolvimentos mais recentes no estudo do coeficiente de dispersão axial em colunas de extração, especialmente as de pratos alternativos e de fluxo pulsado, consistindo basicamente na análise e interpretação dos seus principais resultados.

No presente capítulo apresentaremos um detalhamento da parte experimental, incluindo a descrição da montagem e o princípio de funcionamento do equipamento, a marcha utilizada no levantamento e na interpretação dos dados, bem como o procedimento realizado para a variação sistemática dos parâmetros experimentais.

Neste capítulo também iremos abordar o Modelo da Dispersão, que será utilizado como forma de determinação do coeficiente de dispersão axial experimental, com base nos dados obtidos.

III.2 - CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento foi montado com o objetivo de avaliar o comportamento dos fatores que afetam a hidrodinâmica deste tipo de coluna, como o coeficiente de dispersão axial, a fração volumétrica retida da fase dispersa e a eficiência de extração, numa coluna de pratos alternativos, permitindo-se a obtenção destes importantes parâmetros de projeto do equipamento.

A coluna utilizada neste estudo, foi construída encaixando-se quatro cilindros de vidro com 15,5 cm de altura e 5,5 cm de diâmetro; a junção foi feita usando-se flanges de PVC, obtendo-se um comprimento total de 97 cm. No interior desta foram colocadas pratos de PVC perfurados com 5,0 cm de diâmetro. Os pratos são conectados uns aos outros por meio de uma haste de PVC, que permite a variação do espaçamento entre os mesmos. A haste é acoplada a um braço móvel de metal, que, está conectada a uma polia, acionada por um pequeno motor, como mostra a Figura III.01.

A este motor está associado um regulador de tensão ("dimmer"), que possibilita a variação da frequência de pulsação transmitida aos pratos, através do sistema de acoplamento já descrito. O ajuste da amplitude de pulsação é feito por meio do deslocamento da posição do braço móvel na polia.

A vazão de alimentação da fase contínua é controlada por meio de um rotâmetro devidamente calibrado, segundo a curva mostrada na Figura III.02.

Através da Figura III.02 podemos determinar a vazão de operação, a partir da posição do flutuador no rotâmetro. Os dados que serviram de base para a construção desta curva estão listados no Apêndice A.

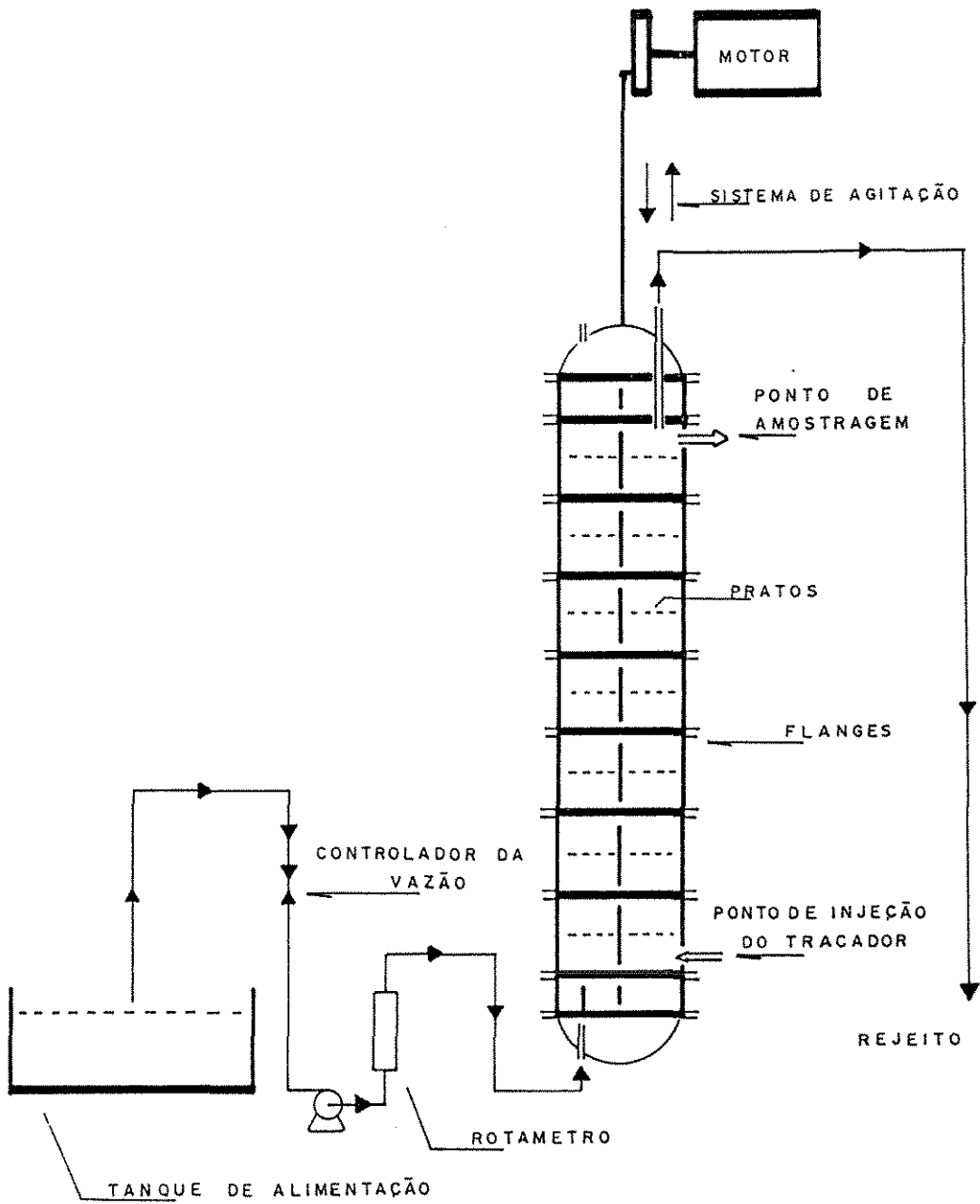


FIGURA III - 01 - APARELHAGEM EXPERIMENTAL.

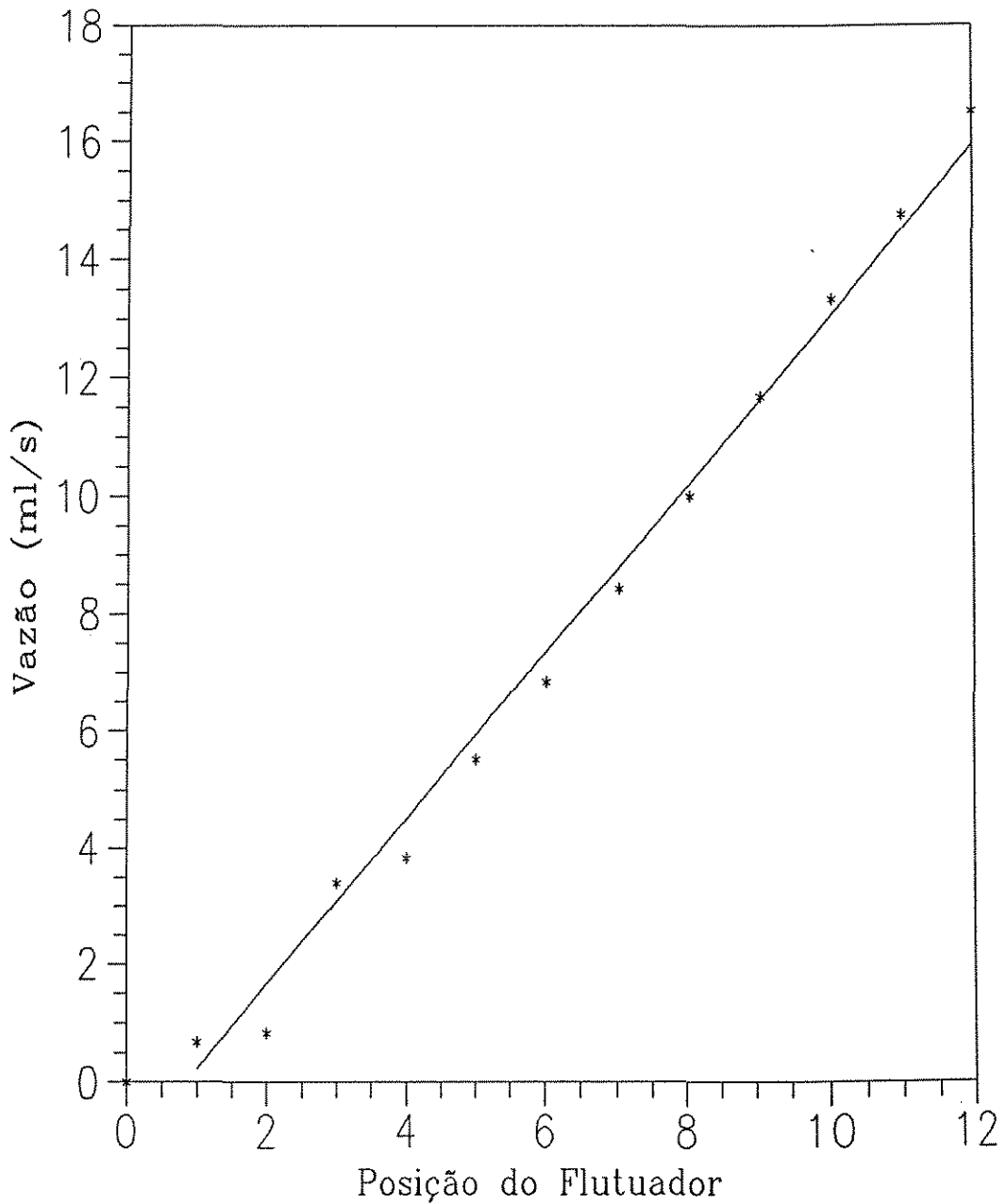


Figura III.02 – Curva de Calibração
Posição do Flutuador
versus Vazão de Água

Os experimentos foram realizados com uma única fase, utilizando-se água, a qual é bombeada do reservatório, alimentando a coluna pelo fundo.

Este aparato experimental permite a investigação de diversas variáveis que possam influenciar no fenômeno da mistura axial existente na coluna.

III.3 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO

No processo de extração as duas fases permanecem em contato por um tempo necessário para que se atinja a eficiência de extração desejada, que é função do tipo de equipamento utilizado.

Nas colunas de extração de pratos alternativos que operam com sistemas bifásicos, vimos que o líquido mais pesado decanta e o mais leve flutua, como mostra a Figura III.03, de modo que existe uma camada bem definida de cada fase no estágio, quando o mecanismo de pulsação encontra-se desligado.

Quando os pratos movimentam-se para cima, o líquido como um todo permanece praticamente estacionário e a fase mais pesada (em repouso no topo de cada prato) tem que passar através das aberturas dos mesmos, na forma de uma chuva de jatos que são dispersos como gotas no líquido mais leve, mostrado na Figura III.04.

No movimento descendente dos pratos, mostrado na Figura III.05, um processo semelhante desenvolve-se na parte superior dos pratos, sendo que a fase leve é injetada na fase pesada.

Desta forma, a fase pesada e a fase leve entram em contato íntimo numa distribuição finamente uniforme. Este processo ocorre simultaneamente, e de modo análogo, em todos os estágios do equipamento. A turbulência da corrente líquida é intensificada com a movimentação dos pratos, melhorando a eficiência de extração.

No estudo da dispersão axial neste equipamento, utilizamos a operação em única fase, observando-se uma intensificação da mistura do traçador com a fase contínua em toda a coluna.

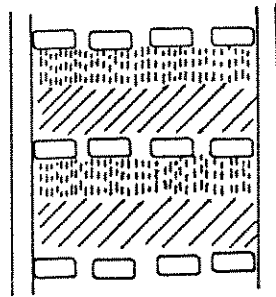


FIGURA III-03 - REPRESENTAÇÃO DA POSIÇÃO DAS CAMADAS DO FLUIDO NO ESPAÇO ENTRE OS PRATOS.

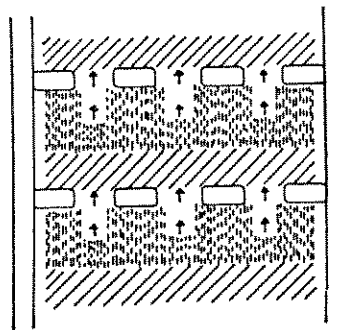


FIGURA III-04 - MOVIMENTAÇÃO DOS PRATOS PARA CIMA.

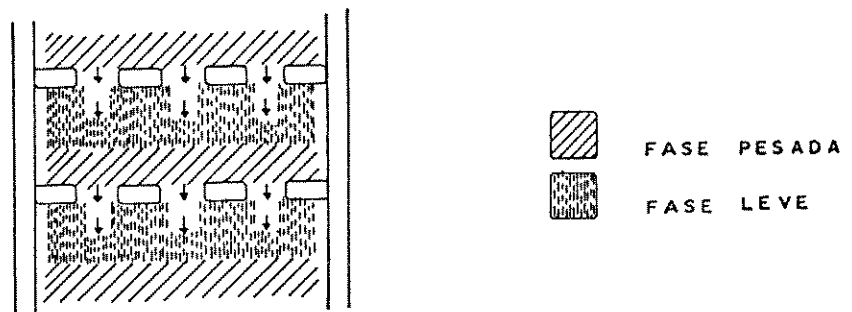


FIGURA III-05 - MOVIMENTAÇÃO DOS PRATOS PARA BAIXO.

III.4 - OBTENÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

A obtenção dos dados experimentais para caracterização da mistura axial na coluna foi realizada através da análise do perfil de concentração do traçador em função do tempo de residência. Os dados para a construção deste perfil foram obtidos analisando-se as amostras coletadas num dado ponto de amostragem, em intervalos de tempo pré-fixados, utilizando o Modelo da Dispersão, o qual será descrito em itens subsequentes.

Neste trabalho utilizou-se a técnica da injeção de um pulso instantâneo de traçador, que consiste na rápida introdução de um volume especificado do traçador, com concentração conhecida, ($C_0 = 0,005 \text{ g/ml}$), no estágio mais próximo do fundo da coluna (vide Figura III.01). O traçador a ser utilizado deve ser solúvel em apenas uma das fases. No nosso caso, o coeficiente de dispersão axial foi determinado utilizando-se uma única fase. O corante utilizado como traçador foi o alaranjado de metila, que é solúvel na fase considerada.

A coleta das amostras foram realizadas em intervalo de tempo de 60 segundos, num ponto situado próximo ao topo da coluna (vide Figura III.01) até que a concentração do traçador fosse não detectável. A concentração de cada amostra foi determinada por meio de um espectrofotometro de marca Procion Sc-90, previamente calibrado.

A curva de calibração do instrumento, mostrada na Figura III.06, foi construída experimentalmente através da medição da transmitância de várias soluções de concentração conhecida do traçador a ser utilizado.

Os dados que serviram de base para a construção desta curva estão listados no Apêndice A, bem como todos os resultados experimentais obtidos através deste procedimento constam no Apêndice B deste trabalho.

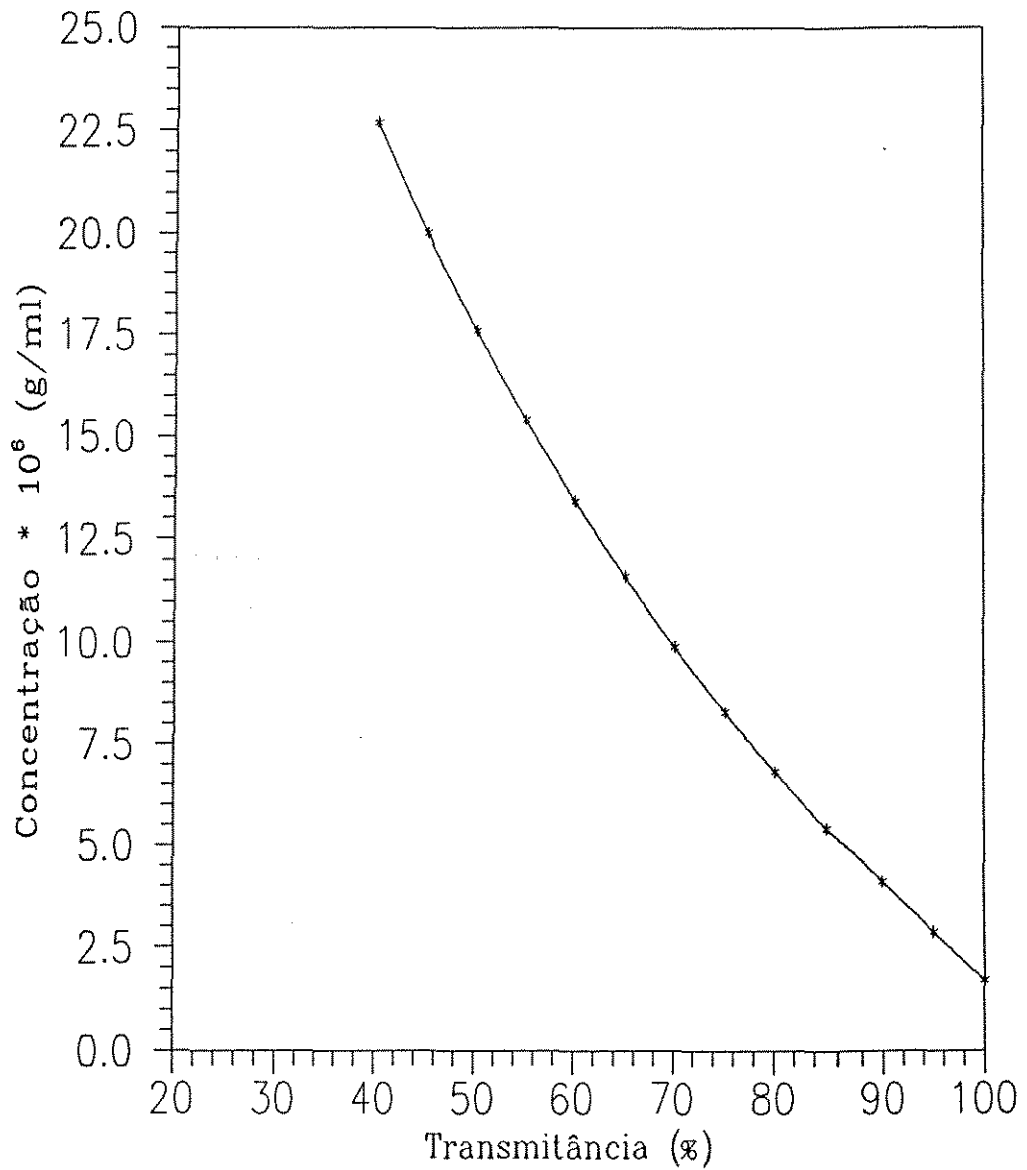


Figura III.06 – Curva de Calibração
Transmitância versus
Concentração da Solução
de Alaranjado de Metila

III.5 - VARIAÇÃO SISTEMÁTICA DOS PARÂMETROS

A estratégia adotada para o estudo do coeficiente de dispersão axial envolveu uma grande diversidade de situações experimentais. O procedimento adotado abrangeu um número razoável de configurações geométricas e de condições operacionais, capazes de fornecerem os dados necessários à análise do comportamento deste parâmetro hidrodinâmico.

A combinação de variáveis experimentais utilizada neste estudo será mostrada na Tabela III.01, a qual será melhor detalhada no capítulo subsequente, onde apresentaremos uma análise destas variáveis.

A finalidade principal destas modificações realizadas é permitir a análise do comportamento dos parâmetros e sua influência no cálculo do coeficiente de dispersão axial.

Tabela III.01 - Variação Sistemática dos Parâmetros Experimentais

| Número de Pratos | Espaçamento (cm) | Área Livre (%) | Amplitude (cm) | Vazão (ml/s) | Frequência (s^{-1}) |
|------------------|------------------|----------------|----------------|--------------|-------------------------|
| 4 | 17 | 38 | 8 | 10,0 | 0,4 |
| 4 | 17 | 38 | 8 | 10,0 | 0,7 |
| 4 | 17 | 38 | 8 | 10,0 | 1,2 |
| 4 | 17 | 38 | 8 | 10,0 | 1,9 |
| 4 | 17 | 38 | 8 | 6,83 | 0,4 |
| 4 | 17 | 38 | 8 | 6,83 | 0,7 |
| 4 | 17 | 38 | 8 | 6,83 | 1,2 |
| 4 | 17 | 38 | 8 | 6,83 | 1,9 |
| 4 | 17 | 38 | 6 | 10,0 | 0,4 |
| 4 | 17 | 38 | 6 | 10,0 | 0,7 |
| 4 | 17 | 38 | 6 | 10,0 | 1,2 |
| 4 | 17 | 38 | 6 | 10,0 | 1,9 |
| 4 | 17 | 38 | 6 | 6,83 | 0,4 |
| 4 | 17 | 38 | 6 | 6,83 | 0,7 |
| 4 | 17 | 38 | 6 | 6,83 | 1,2 |
| 4 | 17 | 38 | 6 | 6,83 | 1,9 |
| 4 | 17 | 38 | 4 | 10,0 | 0,4 |
| 4 | 17 | 38 | 4 | 10,0 | 0,7 |
| 4 | 17 | 38 | 4 | 10,0 | 1,2 |
| 4 | 17 | 38 | 4 | 10,0 | 1,9 |
| 4 | 17 | 38 | 4 | 6,83 | 0,7 |
| 4 | 17 | 38 | 4 | 6,83 | 1,2 |
| 4 | 17 | 38 | 4 | 6,83 | 1,9 |
| 4 | 17 | 20 | 8 | 10,0 | 0,4 |

Tabela III.01 - Variação Sistemática dos Parâmetros Experimentais
(continuação)

| Número de Pratos | Espaçamento (cm) | Área Livre (%) | Amplitude (cm) | Vazão (ml/s) | Frequência (s^{-1}) |
|------------------|------------------|----------------|----------------|--------------|-------------------------|
| 4 | 17 | 20 | 8 | 10,0 | 0,7 |
| 4 | 17 | 20 | 8 | 10,0 | 1,2 |
| 4 | 17 | 20 | 8 | 10,0 | 1,9 |
| 4 | 17 | 20 | 8 | 6,83 | 0,4 |
| 4 | 17 | 20 | 8 | 6,83 | 0,7 |
| 4 | 17 | 20 | 8 | 6,83 | 1,2 |
| 4 | 17 | 20 | 8 | 3,83 | 0,7 |
| 4 | 17 | 20 | 8 | 3,83 | 1,2 |
| 4 | 17 | 20 | 8 | 3,83 | 1,9 |
| 4 | 17 | 20 | 6 | 10,0 | 0,4 |
| 4 | 17 | 20 | 6 | 10,0 | 0,7 |
| 4 | 17 | 20 | 6 | 10,0 | 1,2 |
| 4 | 17 | 20 | 6 | 10,0 | 1,9 |
| 4 | 17 | 20 | 6 | 6,83 | 0,4 |
| 4 | 17 | 20 | 6 | 6,83 | 0,7 |
| 4 | 17 | 20 | 6 | 6,83 | 1,2 |
| 4 | 17 | 20 | 6 | 6,83 | 1,9 |
| 4 | 17 | 20 | 6 | 3,83 | 0,4 |
| 4 | 17 | 20 | 6 | 3,83 | 0,7 |
| 4 | 17 | 20 | 4 | 10,0 | 0,4 |
| 4 | 17 | 20 | 4 | 10,0 | 0,7 |
| 4 | 17 | 20 | 4 | 10,0 | 1,2 |
| 4 | 17 | 20 | 4 | 10,0 | 1,9 |
| 4 | 17 | 20 | 4 | 6,83 | 0,7 |

Tabela III.01 - Variação Sistemática dos Parâmetros Experimentais
(continuação)

| Número de Pratos | Espaçamento (cm) | Área Livre (cm) | Amplitude (cm) | Vazão (ml/s) | Frequência (s^{-1}) |
|------------------|------------------|-----------------|----------------|--------------|-------------------------|
| 4 | 17 | 20 | 4 | 6,83 | 1,2 |
| 4 | 17 | 20 | 4 | 6,83 | 1,9 |
| 4 | 17 | 20 | 4 | 3,83 | 0,4 |
| 4 | 17 | 20 | 4 | 3,83 | 1,2 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 10,0 | 0,4 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 10,0 | 0,7 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 10,0 | 1,2 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 10,0 | 1,9 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 6,83 | 0,7 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 6,83 | 1,2 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 6,83 | 1,9 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 3,83 | 0,7 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 3,83 | 1,9 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 0,83 | 0,7 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 0,83 | 1,2 |
| 7 | 10 | 20 | 8 | 0,83 | 1,9 |
| 7 | 10 | 20 | 6 | 10,0 | 0,4 |
| 7 | 10 | 20 | 6 | 10,0 | 0,7 |
| 7 | 10 | 20 | 6 | 10,0 | 1,2 |
| 7 | 10 | 20 | 6 | 10,0 | 1,9 |
| 7 | 10 | 20 | 6 | 6,83 | 0,4 |
| 7 | 10 | 20 | 6 | 6,83 | 0,7 |
| 7 | 10 | 20 | 6 | 6,83 | 1,2 |
| 7 | 10 | 20 | 6 | 6,83 | 1,9 |

Tabela III.01 - Variação Sistemática dos Parâmetros Experimentais
(continuação)

| Número de Pratos | Espaçamento (cm) | Área Livre (cm) | Amplitude (cm) | Vazão (ml/s) | Frequência (s ⁻¹) |
|------------------|------------------|-----------------|----------------|--------------|-------------------------------|
| 7 | 10 | 20 | 6 | 3,83 | 0,4 |
| 7 | 10 | 20 | 6 | 3,83 | 0,7 |
| 7 | 10 | 20 | 6 | 3,83 | 1,2 |
| 7 | 10 | 20 | 6 | 3,83 | 1,9 |
| 7 | 10 | 20 | 4 | 10,0 | 0,4 |
| 7 | 10 | 20 | 4 | 10,0 | 0,7 |
| 7 | 10 | 20 | 4 | 10,0 | 1,2 |
| 7 | 10 | 20 | 4 | 10,0 | 1,9 |
| 7 | 10 | 20 | 4 | 6,83 | 0,4 |
| 7 | 10 | 20 | 4 | 6,83 | 0,7 |
| 7 | 10 | 20 | 4 | 6,83 | 1,2 |
| 7 | 10 | 20 | 4 | 6,83 | 1,9 |
| 7 | 10 | 20 | 4 | 3,83 | 0,4 |
| 7 | 10 | 20 | 4 | 3,83 | 0,7 |
| 7 | 10 | 20 | 4 | 3,83 | 1,9 |

sendo que:

- 4 cm representa a amplitude mínima;
- 6 cm representa a amplitude intermediária e
- 8 cm representa a amplitude máxima.

III.6 - MÉTODO DE CÁLCULO

O estudo da mistura de fluidos em processos químicos, tem recebido muita atenção nos últimos anos. O método mais simples basea-se na analogia entre a mistura no escoamento efetivo e o processo de difusão, com o coeficiente de difusão modificado. Este é chamado Modelo da Dispersão, onde, inicialmente, as condições implicam que não existam regiões estagnantes do fluido no equipamento. Nota-se que, com a variação das intensidades de turbulência ou mistura, as previsões deste modelo podem variar desde o escoamento empistonado ("plug flow") até o de mistura perfeita.

Inicialmente a equação da difusão foi ajustada para descrever o processo da dispersão num reator do tipo empistonado, sendo, posteriormente, também utilizada para descrever o processo macroscópico de mistura que ocorre no interior de outros tipos de equipamentos. A equação que descreve o grau de mistura considerando a mistura na direção radial igual em qualquer ponto, é expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{III.1})$$

para tornar a equação III.1 adimensional é necessário que os parâmetros desta expressão sejam adimensionais.

A seguir temos as condições que tornam cada parâmetro da equação acima adimensional.

$$z = \frac{x}{H} \quad (\text{III.2})$$

e

$$\theta = \frac{t}{\tau_{RM}} = \frac{t V}{H} \quad (\text{III.3})$$

Assim, a equação diferencial que representa o Modelo da Dispersão na forma adimensional é mostrada a seguir.

$$\frac{\partial c}{\partial \theta} = \left(\frac{E}{V H} \right) \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \frac{\partial c}{\partial z} \quad (\text{III.4})$$

Nesta equação, nota-se que o grupo adimensional $(E/V.H)$, chamado número de dispersão do equipamento (conhecido também como o inverso do número de Péclet), é o parâmetro que mede a extensão da dispersão axial.

Para dispersão de pequena intensidade $((E/V.H)$ pequeno), o perfil de concentração do traçador em função do tempo não muda sua forma significativamente.

Sob essas condições (dispersão pequena), podemos observar que a solução da equação III.4 não é difícil e dá uma curva simétrica, que representa uma família de curvas gaussianas, normais ou de erro com média e variância.

Desta forma, a solução da equação III.4 foi apresentada por Carslaw in Levenspiel e Smith (1957), descrita da seguinte forma:

$$C_{(\theta)} = \frac{1}{2 \sqrt{3,14 \left(\frac{E}{V H} \right)}} \exp \left[- \frac{(1 - \theta)^2}{4 \left(\frac{E}{V H} \right)} \right] \quad (\text{III.5})$$

Nota-se que $(E/V.H)$ é um parâmetro da equação III.5, o qual pode ser obtido a partir da Figura III.07.

Esta Figura destaca algumas maneiras de avaliar esse parâmetro a partir de uma curva experimental: calculando sua variancia, medindo sua altura máxima ou sua largura no ponto de inflexão ou encontrando a largura que inclui 68 % da área.

Para pequenas intensidades de dispersão, são possíveis várias simplificações e aproximações na análise das curvas de concentração do traçador em função do tempo de residência, facilitando a caracterização nos equipamentos que apresentam este tipo de fenômeno.

Para uma dispersão de grande intensidade, a curva do traçador modifica a forma significativamente durante o tempo que ele passa pelo ponto de registro, a curva medida não é simétrica e apresenta um prolongamento em forma de cauda, devido a existência do fluxo reverso ("back flow"). Nesta situação, as condições de escoamento no ponto de injeção e no ponto de medida (chamado condições de contorno) influirão na forma da curva obtida. Neste caso, temos o surgimento de dois casos importantes que é a consideração de sistema fechado - caracterizado pela presença de mudança no tipo de escoamento nas fronteiras - e o sistema aberto - caracterizado por não haver perturbações nas fronteiras.

Nos recipientes abertos, existem dois métodos de medidas conhecidas o chamado "método através da parede", onde o registro da concentração do traçador é feito à medida que ele passa pelo ponto de amostragem; e o "método de copo de mistura", no qual a medida é feita em diversos pontos da coluna, onde se determina a concentração do traçador em cada ponto.

Nos recipientes abertos, a solução da equação III.04 pode ser obtida analiticamente. Uma solução desenvolvida por Levenspiel e Smith

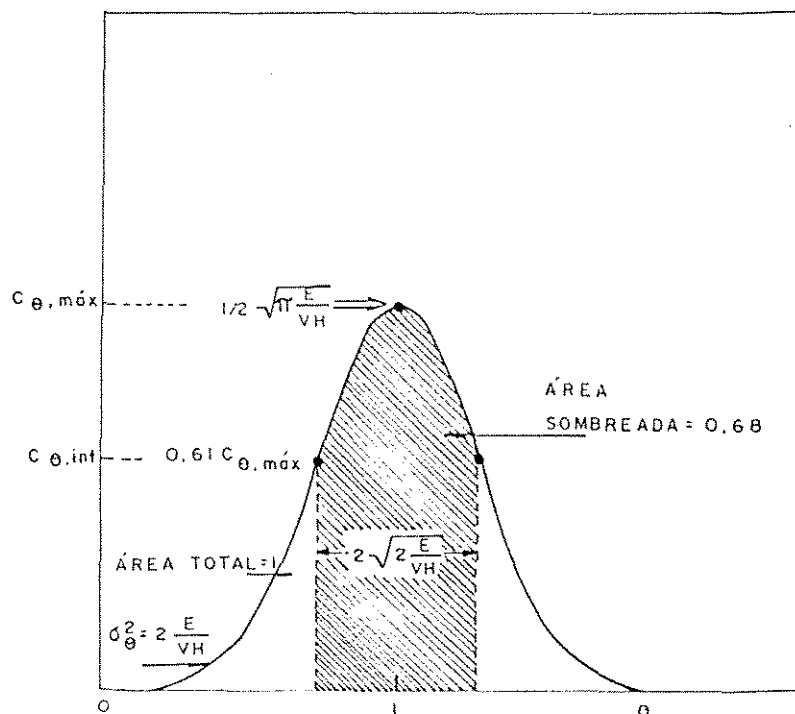


FIGURA III-07 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA GAUSSIANA

(1957), aplicada a uma situação experimental, onde a medida da concentração do traçador é feita numa dada posição à jusante do ponto de injeção do mesmo, sendo esta concentração uma função do tempo de residência, resultando na seguinte equação na forma adimensional:

$$C_{(\theta)} = \frac{1}{2 \sqrt{3,14} \theta \left(\frac{E}{V H}\right)} \text{Exp} \left[-\frac{(1 - \theta)^2}{4 \theta \left(\frac{E}{V H}\right)} \right] \quad (\text{III.6})$$

com média e variância respectivamente dada da seguinte forma:

$$\theta = \frac{t}{t_{RM}} = 1 + 2 \frac{E}{V H} \quad (\text{III.7})$$

$$\sigma_o^2 = \frac{\sigma^2}{t_{RM}^2} = 2 \left(\frac{E}{V H}\right) + 8 \left(\frac{E}{V H}\right)^2 \quad (\text{III.8})$$

No caso de recipientes fechados, o cálculo do número de dispersão é feito por métodos numéricos. Para exemplificar, temos as curvas apresentadas na Figura III.08. Nota-se que, para pequenos valores do número de dispersão ($E/V.H$); ou seja, se ($E/V.H$) tende para zero, o fluxo se comporta como o de um reator do tipo empistonado, já para valores elevado deste grupo adimensional, temos a indicação de mistura perfeita.

A média e a variância respectivamente dessa família de curva foi desenvolvida por Bischoff e Levenspiel (1962), que obtiveram as seguintes expressões:

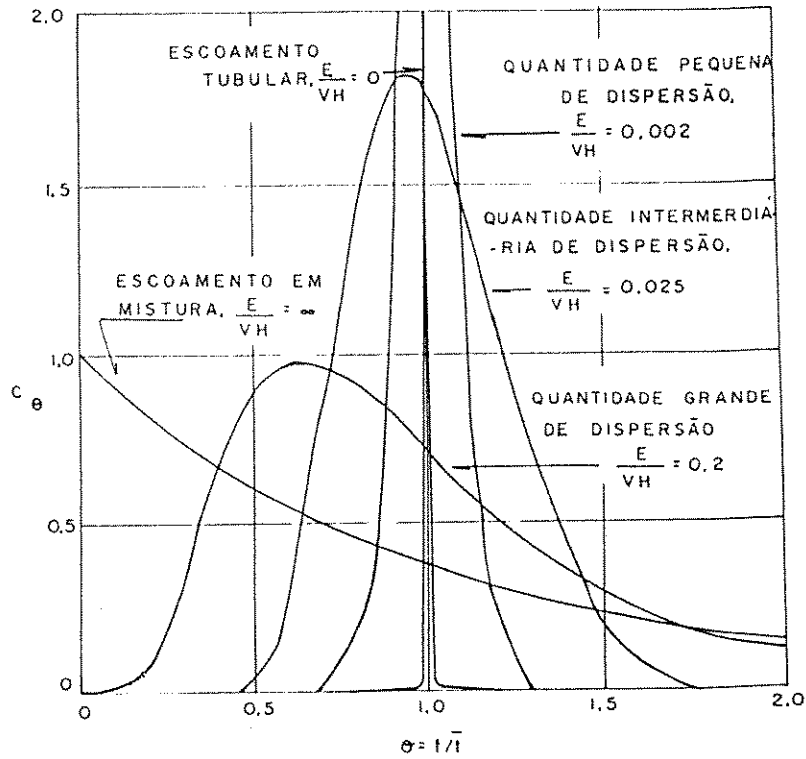


FIGURA III-08 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS OBTIDAS PARA UM RECIPIENTE FECHADO.

$$\theta = \frac{t}{t_{RM}} = 1 \quad (\text{III.9})$$

$$\sigma_o^2 = \frac{\sigma^2}{t_{RM}^2} = 2 \left(\frac{E}{V H} \right) - 2 \left(\frac{E}{V H} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{V H}{E}} \right) \quad (\text{III.10})$$

Portanto, para usar este método, a concentração do traçador deve ser medida em dois pontos discretos (entrada e saída).

O cálculo do tempo de residência médio é realizado da seguinte forma:

$$t_{RM} = \frac{\int_0^{\infty} t C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \quad (\text{III.11})$$

Para um número discreto de pontos, a seguinte aproximação pode ser considerada, com o objetivo de simplificar o cálculo do tempo médio de residência, representado da seguinte forma:

$$t_{RM} \equiv \frac{\sum t_j C_j \Delta t_j}{\sum C_j \Delta t_j} \quad (\text{III.12})$$

A variância é um parâmetro de grande importância neste estudo, o qual representa a dispersão dos pontos representativos do tempo de residência, obtidos experimentalmente. A expressão matemática utilizada para o cálculo deste parâmetro é a seguinte:

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - t_{RM})^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \quad (\text{III.13})$$

Assim, para um número discreto de pontos, é possível realizar simplificações, obtendo-se a seguinte expressão:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (t_j - t_{RM})^2 C_j \Delta t_j}{\sum C_j \Delta t_j} = \frac{\sum t_j^2 C_j \Delta t_j}{\sum C_j \Delta t_j} - t_{RM}^2 \quad (\text{III.14})$$

A variancia representa o quadrado da amplitude da distribuição. Ela é particularmente útil quando se pretende ajustar curvas experimentais a uma família de curvas teóricas.

Assim, a resolução da equação III.10 deve ser feita numericamente, utilizando-se um método adequado. A aproximação inicial a ser utilizada pelo programa despreza o segundo termo da equação III.10, ficando o número de dispersão igual à metade da variança.

A correção do valor do número de dispersão é feita utilizando-se a equação III.10 na sua forma completa, que, por sua vez, é dependente da função erro complementar, tornando sua resolução analítica muito difícil e com várias simplificações.

No nosso trabalho, a caracterização do coeficiente de dispersão axial experimental foi realizada utilizando as equações desenvolvidas para o Modelo da Dispersão em recipientes fechados, pois, no caso do nosso equipamento, existe variações nas fronteiras que são delimitadas pelos pontos de injeção e de amostragem (fundo e topo da coluna, respectivamente).

Foi desenvolvido um programa, utilizando a linguagem de programação Turbo Pascal, o qual é denominado de DISPERSA, listado no

Apêndice C. A finalidade deste é a determinação do número de dispersão e, por conseguinte, o coeficiente de dispersão axial, utilizando-se como método numérico o Método Iterativo.

Os tópicos abordados nesta seção estão fundamentados em aspectos teóricos já consagrados, os quais servirão de base para a análise e interpretação dos resultados experimentais, assunto este que será abordado nos capítulos subsequentes.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DOS RESULTADOS

IV.1 - INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores, fizemos uma apresentação do estado atual em que se encontra o estudo da dispersão axial em contactores diferenciais que operam com um sistema de agitação, em especial nas colunas de extração de fluxo pulsado e de pratos alternativos. Também foi feita uma descrição do equipamento utilizado, do seu princípio de funcionamento, da forma de obtenção dos dados experimentais, da variação sistemática de parâmetros e do modelo utilizado para interpretar os resultados experimentais.

Neste capítulo iremos fazer uma breve descrição da existência ou não de fluxo reverso ("back flow"), analisando-se alguns perfis de concentração do traçador em função do tempo de residência. Será realizada uma avaliação da influência das variáveis operacionais, através de gráficos do número de dispersão (inverso do número de Péclet) - que é determinado utilizando o Modelo da Dispersão - versus o parâmetro operacional a ser analisado, bem como uma avaliação dos parâmetros geométricos sob a forma de tabelas.

IV.2 - AVALIAÇÃO DO EFEITO DO FLUXO REVERSO ("BACK FLOW") NA DISPERSÃO

Um grande número de processos industriais trabalham com os dois tipos de escoamento ideal: o empistonado ("plug flow") e o de mistura perfeita, mostrados na Figura IV.01. Embora muitos destes processos não sigam completamente este tipo de escoamento, uma boa parte deles se aproxima, com erro desprezível, do comportamento ideal. Em outros casos, o desvio em relação ao escoamento ideal pode ser considerável.

Na Figura IV.01 observa-se que quando não existe nenhum tipo de fluxo reverso o perfil da concentração com o tempo é um pico (escoamento empistonado). Isto ocorre para o escoamento em regime laminar e em equipamentos onde não se verifica a existência de mistura. Já no caso em que existe um processo de mistura intenso; ou seja, em qualquer ponto do equipamento a mistura é igual (escoamento tipo mistura perfeita). Esta mistura é proporcionada pela turbulência do fluxo intenso e pelo sistema de agitação presente no equipamento.

Os desvios a partir do escoamento ideal podem ser causados por diversos fatores, em especial pelo fenômeno do fluxo reverso, que geralmente ocorre no interior da maioria dos equipamentos de processos, tais como trocadores de calor, colunas de extração e de destilação e reatores. Este fenômeno muitas vezes deve ser evitado, pois ele pode prejudicar o desempenho da unidade.

Com a existência do fluxo reverso surge o fenômeno da dispersão axial, caracterizado por um modelo de fluxo intermediário: nem fluxo empistonado e nem mistura perfeita, conforme mostra a Figura IV.02.

Nesta, observa-se que a mistura com fluxo reverso tende a um regime de escoamento empistonado, quando a quantidade de fluxo reverso é pequena em relação a mistura axial. Se o fluxo reverso é muito grande,

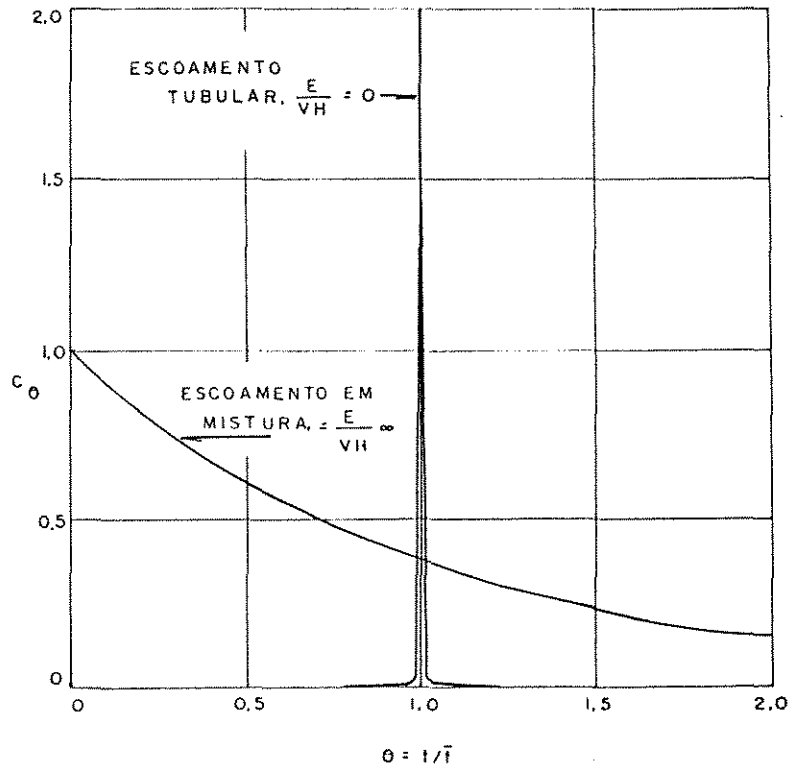


FIGURA IV - 01 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO GRAU DE MISTURA PARA O ESCOAMENTO IDEAL.

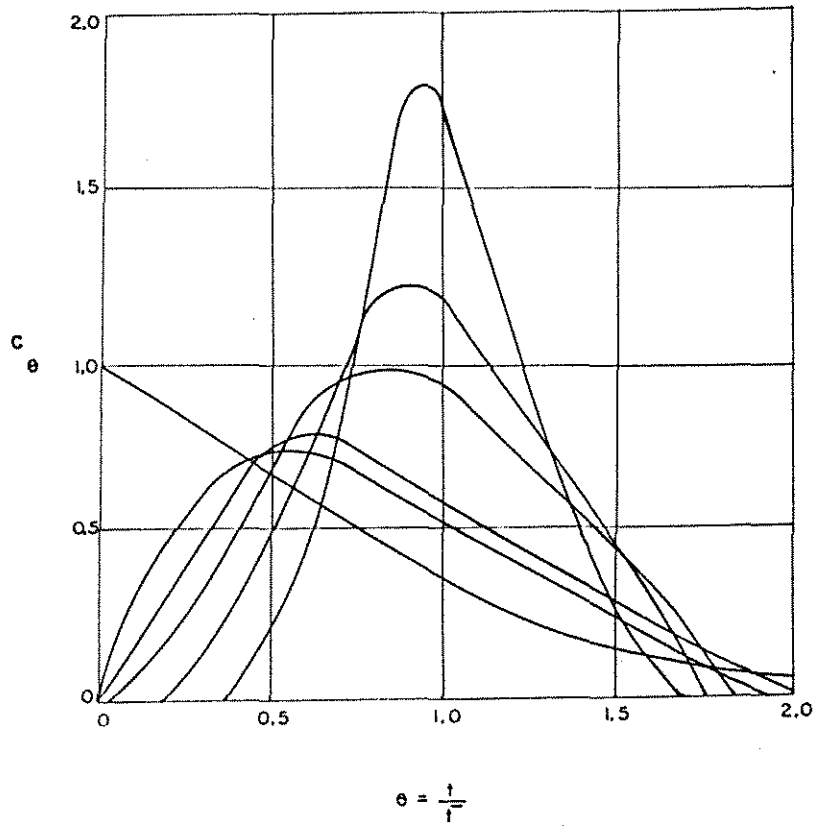


FIGURA IV-02 - INFLUÊNCIA DO FLUXO REVERSO.

então a mistura axial resulta num regime de mistura perfeita.

Uma avaliação qualitativa do efeito do fluxo reverso, baseada nos resultados experimentais, foi realizada através de uma análise gráfica da concentração adimensional versus o tempo adimensional, mostrado nas Figuras IV.03 e IV.04.

Nas figuras apresentadas observamos que o tempo para se atingir o máximo da concentração é diferente, isto se deve a presença de uma maior ou menor quantidade de fluxo reverso. Na Figura IV.03 nota-se um menor tempo médio de residência do traçador, provocado por uma menor velocidade de pulsação, a qual não conduz a grandes intensidades de fluxo reverso. Já na Figura IV.04 observa-se que o tempo médio de residência é maior e que a curva apresenta uma cauda bem maior que na anterior, onde a concentração tende para zero, indicando a existência de uma maior mistura axial, que tem como consequência o aumento da intensidade do fluxo reverso.

Do ponto de vista da transferência de massa, a existência do fluxo empistonado ("plug flow") não é desejado, pois este tem a desvantagem de oferecer uma pequena superfície de contato, que prejudica o fenômeno da transferência de massa. Isto deve-se à ausência de mistura, característica do regime empistonado.

Por outro lado, a existência de um fluxo reverso intenso é desejada, pois este tende a um escoamento do tipo mistura perfeita, o qual geralmente proporciona um aumento na transferência de massa, devido à existência de um maior grau de mistura no interior do equipamento.

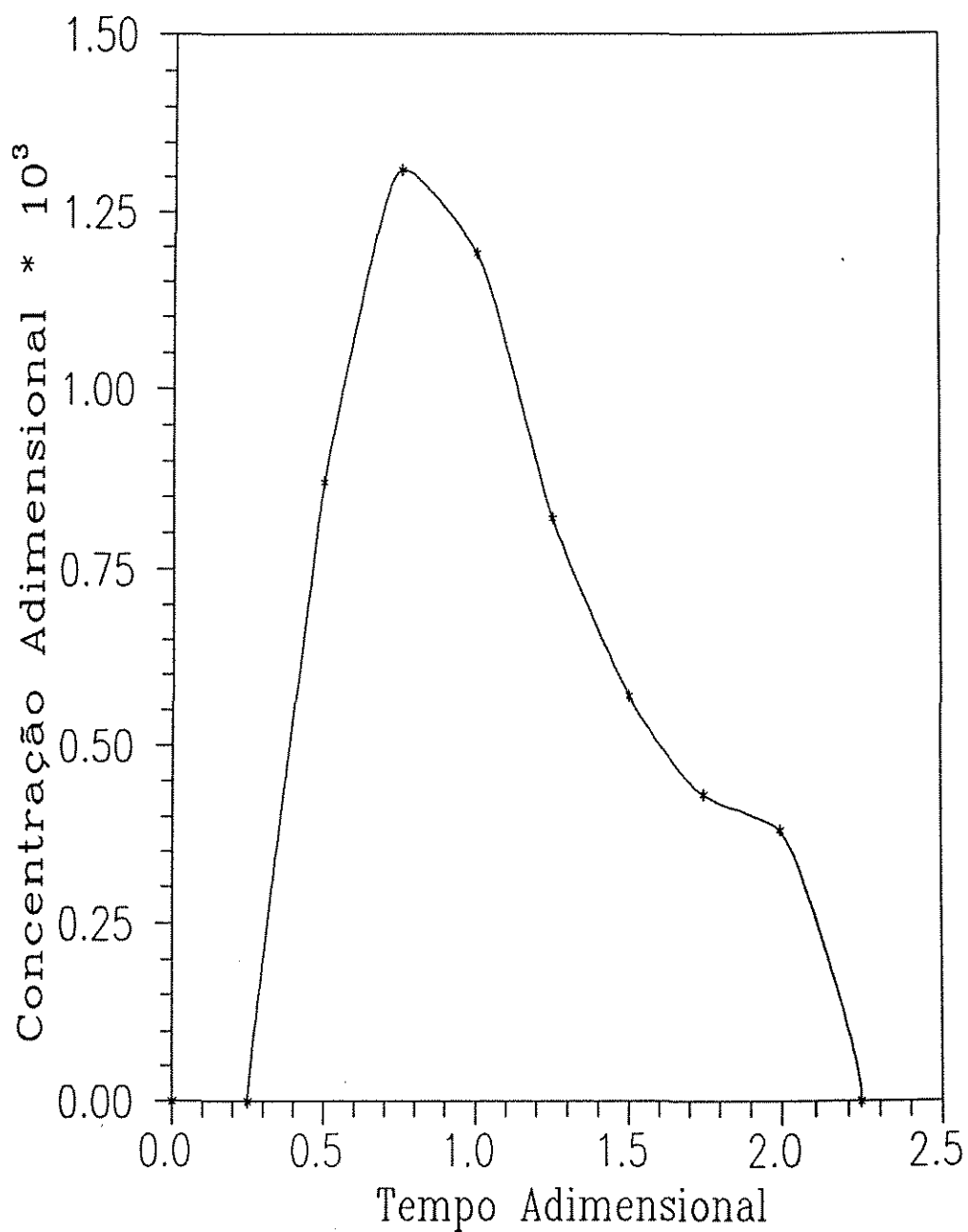


Figura IV.03 – Concentração Adimensional vs Tempo Medio de Residência Adimensional (para baixa velocidade de pulsação)

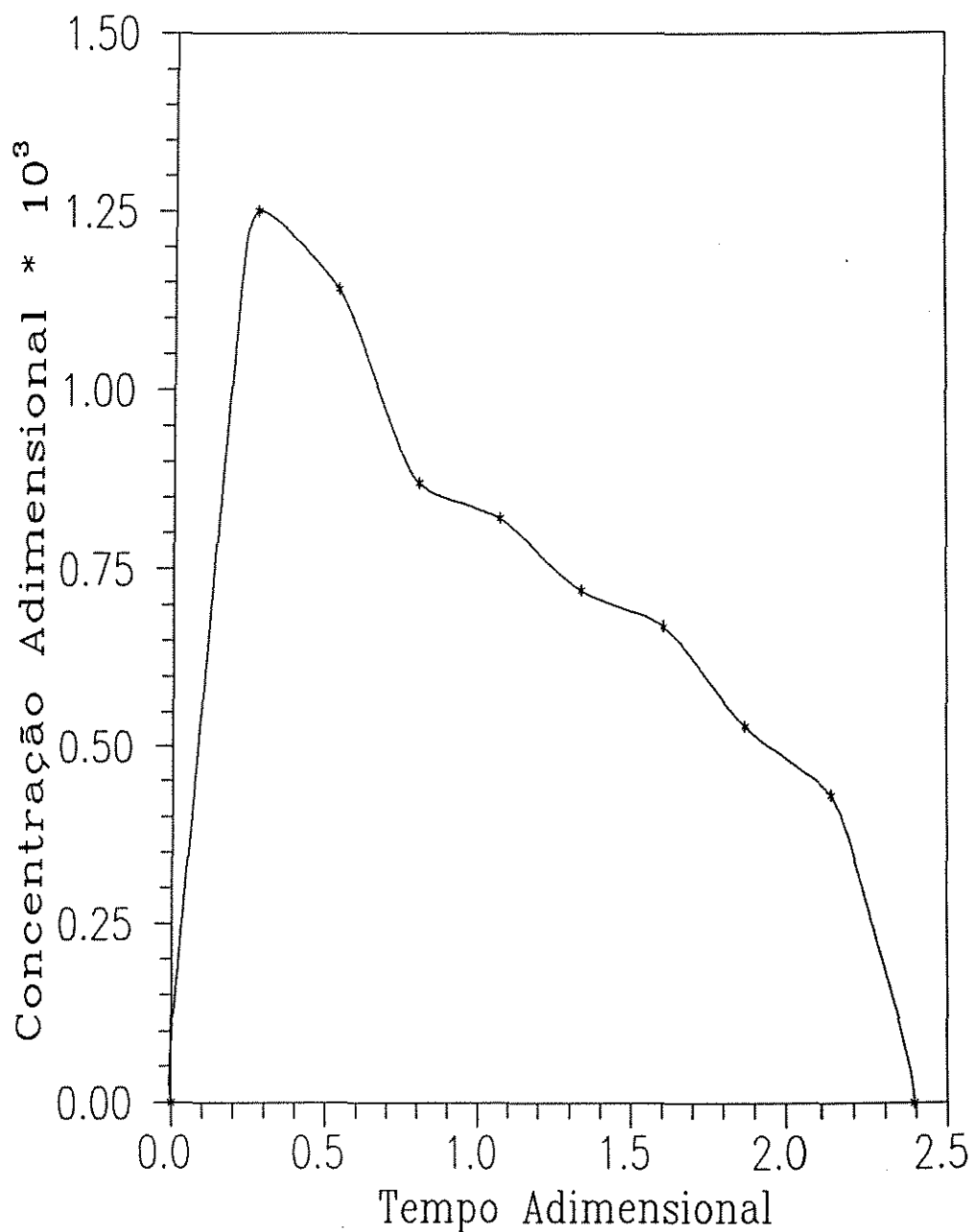


Figura IV.04 - Concentração Adimensional vs Tempo Medio de Residência Adimensional
(para alta velocidade de pulsação)

IV.3 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NA DISPERSÃO AXIAL

Nesta seção apresentaremos uma avaliação da influência destes parâmetros sobre o coeficiente de dispersão axial, objetivando a identificação das condições operacionais que produzam um melhor desempenho neste tipo de equipamento. Estes parâmetros são de grande importância para o desenvolvimento de projetos em escala industrial eficientes e seguros.

No presente trabalho, o estudo dos parâmetros geométricos e operacionais sobre o número de dispersão será realizado com base numa avaliação do comportamento do número de dispersão em função da variável cujo efeito deseja-se analisar. O procedimento adotado envolve a construção de gráficos e/ou tabelas para diversas condições de operação do equipamento.

IV.3.1 - INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE OS PRATOS NA DISPERSÃO AXIAL

Os espaçamentos entre os pratos utilizados no presente trabalho foram de 10 e 17 cm, sendo que estes espaçamentos estão diretamente relacionados com o número de pratos no interior da coluna de extração, uma vez que o comprimento do extrator não foi alterado. As Figuras IV.05 e IV.06, mostram o arranjo dos pratos no interior da coluna, de acordo com o equipamento.

Na Figura IV.05 o espaçamento entre os pratos é de 17 cm, já na Figura IV.06 o espaçamento é de 10 cm, sendo que o número de pratos

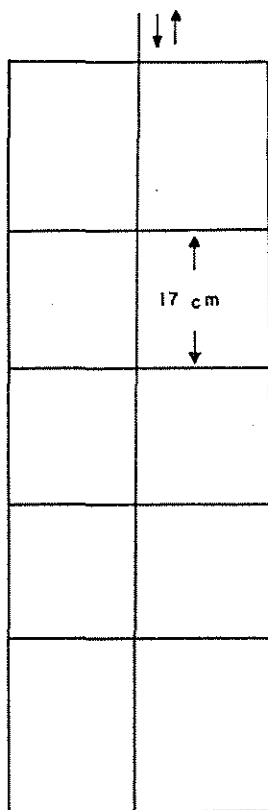


FIGURA IV - 05 - COLUNA COM ESPAÇAMENTO ENTRE OS PRATOS IGUAL A 17 cm.

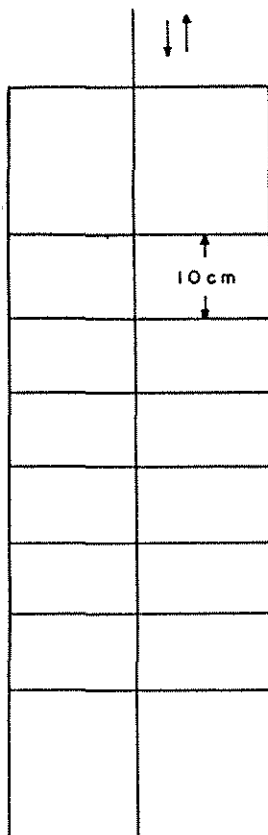


FIGURA IV - 06 - COLUNA COM ESPAÇAMENTO ENTRE OS PRATOS IGUAL A 10 cm.

INSTITUTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO
CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

perfurados é igual a 4 e 7 respectivamente. Em ambos os casos a distância entre o fundo e o primeiro prato é maior que o espaçamento entre os próprios pratos. O mesmo ocorre em relação ao topo da coluna.

A Tabela IV.01 apresenta o comportamento do número de dispersão segundo o espaçamento entre os pratos, em diversas situações operacionais.

Na Tabela IV.01 observamos que, para baixas velocidades de pulsação, o número de dispersão aumenta com o espaçamento entre os pratos. Isto ocorre devido à velocidade de pulsação, ou seja, o produto da amplitude pela frequência, não ser suficiente para produzir uma alta agitação, tornando necessário um maior espaçamento para que os pratos possam percorrer toda a camada líquida existente entre os mesmos, aumentando o efeito da turbulência.

Para elevadas velocidades de pulsação, nota-se que o número de dispersão é inversamente proporcional ao espaçamento entre os pratos. Este comportamento é atribuído à redução da efetividade de agitação, que provoca a diminuição da formação de jatos de gotas. É importante salientar que esta observação é bastante coerente, uma vez que o aumento do espaçamento está diretamente ligado à redução do número de pratos; daí a perda de efetividade de agitação.

IV.3.2 - INFLUÊNCIA DA ÁREA LIVRE DE ESCOAMENTO NA DISPERSÃO AXIAL

O estudo da influência deste parâmetro na dispersão foi realizado utilizando-se pratos com uma fração de área livre de 20 e 38 %. A fração de área livre representa o somatório da área dos furos existentes no prato

Tabela IV.01 - Influência do Espaçamento entre os Pratos no
Número de Dispersão (área livre igual a 20 %)

| Vazão (ml/s) | Frequên- cia (s^{-1}) | Amplitude (cm) | Velocidade Pulsação (cm/s) | E/V.H (Espaçamen- to de 10 cm) | E/V.H (Espaçamen- to de 17 cm) |
|-----------------|------------------------------|-------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 10,0 | 0,4 | 4,0 | 1,6 | 0,145 | 0,170 |
| 3,83 | 0,4 | 4,0 | 1,6 | 0,100 | 0,111 |
| 10,0 | 0,4 | 6,0 | 2,4 | 0,160 | 0,184 |
| 6,83 | 0,4 | 6,0 | 2,4 | 0,130 | 0,150 |
| 3,83 | 0,4 | 6,0 | 2,4 | 0,111 | 0,150 |
| 10,0 | 0,7 | 4,0 | 2,8 | 0,157 | 0,175 |
| 6,83 | 0,7 | 4,0 | 2,8 | 0,104 | 0,125 |
| 10,0 | 0,4 | 8,0 | 3,2 | 0,174 | 0,218 |
| 10,0 | 0,7 | 6,0 | 4,2 | 0,218 | 0,226 |
| 6,83 | 0,7 | 6,0 | 4,2 | 0,180 | 0,196 |
| 3,83 | 0,7 | 6,0 | 4,2 | 0,143 | 0,199 |
| 10,0 | 1,2 | 4,0 | 4,8 | 0,170 | 0,178 |
| 6,83 | 1,2 | 4,0 | 4,8 | 0,125 | 0,141 |
| 10,0 | 0,7 | 8,0 | 5,6 | 0,184 | 0,204 |
| 6,83 | 0,7 | 8,0 | 5,6 | 0,166 | 0,191 |
| 3,83 | 0,7 | 8,0 | 5,6 | 0,139 | 0,179 |
| 10,0 | 1,2 | 6,0 | 7,2 | 0,247 | 0,259 |
| 6,83 | 1,2 | 6,0 | 7,2 | 0,180 | 0,194 |
| 10,0 | 1,9 | 4,0 | 7,6 | 0,192 | 0,164 |
| 6,83 | 1,9 | 4,0 | 7,6 | 0,142 | 0,137 |
| 10,0 | 1,9 | 6,0 | 11,4 | 0,265 | 0,190 |
| 6,83 | 1,9 | 6,0 | 11,4 | 0,197 | 0,182 |
| 10,0 | 1,9 | 8,0 | 15,2 | 0,282 | 0,261 |

dividido pela área total do respectivo prato. As Figuras IV.07 e IV.08, mostram as configurações geométricas dos dois tipos de pratos utilizados.

Na Figura IV.07, cada prato apresenta 62 furos com um diâmetro de aproximadamente 0,3 cm, resultando numa área total dos furos igual a $4,3 \text{ cm}^2$. Já na Figura IV.08, os pratos apresentam 12 furos cada, sendo que cada furo possui um diâmetro de 0,9 cm, dando uma área total dos furos igual a $7,6 \text{ cm}^2$. A área total do prato é de $19,6 \text{ cm}^2$.

O estudo da influência da área livre de escoamento nos pratos foi realizada a partir de uma análise do comportamento do número de dispersão em função desta variável, conforme mostra a Tabela IV.02.

Analisando-se esta tabela, percebe-se que uma menor área livre favorece o aumento do coeficiente de dispersão, principalmente para valores elevados da velocidade de pulsação e da vazão do líquido.

Com a redução da área livre nos pratos, há uma maior restrição ao fluxo, provocando uma redução na quantidade e no tamanho das gotas que atravessam os pratos, resultando numa maior circulação do traçador em cada estágio e, conseqüentemente, um maior coeficiente de dispersão axial.

A mistura que ocorre no interior da coluna é fruto da formação de jatos, que é mais intensa em condições de agitação mais severas.

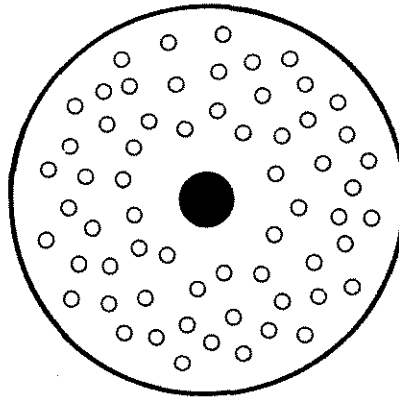


FIGURA IV-07- DISCO COM 20% DE ÁREA LIVRE DE ESCOAMENTO.

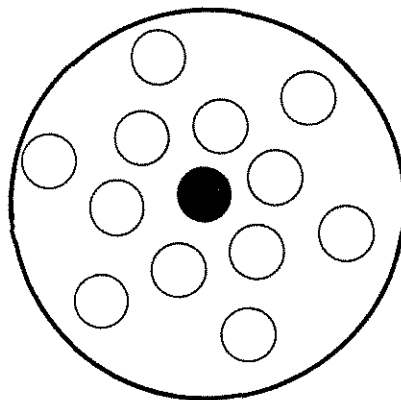


FIGURA IV-08 - DISCO COM 38% DE ÁREA LIVRE DE ESCOAMENTO.

Tabela IV.02 - Influência da Área Livre de Escoamento no
Número de Dispersão (espaçamento igual a 17 cm)

| Vazão (ml/s) | Frequên- cia (s^{-1}) | Amplitude (cm) | Velocidade Pulsção (cm/s) | E/V.H (Área Livre de 20 %) | E/V.H (Área Livre de 38 %) |
|-----------------|------------------------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 10,0 | 0,4 | 4,0 | 1,6 | 0,170 | 0,121 |
| 10,0 | 0,4 | 6,0 | 2,4 | 0,184 | 0,115 |
| 6,83 | 0,4 | 6,0 | 2,4 | 0,130 | 0,122 |
| 10,0 | 0,7 | 4,0 | 2,8 | 0,175 | 0,132 |
| 6,83 | 0,7 | 4,0 | 2,8 | 0,125 | 0,109 |
| 10,0 | 0,4 | 8,0 | 3,2 | 0,218 | 0,151 |
| 6,83 | 0,4 | 8,0 | 3,2 | 0,156 | 0,122 |
| 10,0 | 0,7 | 6,0 | 4,2 | 0,226 | 0,116 |
| 6,83 | 0,7 | 6,0 | 4,2 | 0,180 | 0,123 |
| 10,0 | 1,2 | 4,0 | 4,8 | 0,179 | 0,137 |
| 6,83 | 1,2 | 4,0 | 4,8 | 0,141 | 0,120 |
| 10,0 | 0,7 | 8,0 | 5,6 | 0,204 | 0,149 |
| 6,83 | 0,7 | 8,0 | 5,6 | 0,191 | 0,128 |
| 10,0 | 1,2 | 6,0 | 7,2 | 0,259 | 0,179 |
| 6,83 | 1,2 | 6,0 | 7,2 | 0,180 | 0,146 |
| 10,0 | 1,9 | 4,0 | 7,6 | 0,164 | 0,148 |
| 6,83 | 1,9 | 4,0 | 7,6 | 0,137 | 0,162 |
| 10,0 | 1,2 | 8,0 | 9,6 | 0,233 | 0,188 |
| 6,83 | 1,2 | 8,0 | 9,6 | 0,202 | 0,163 |
| 10,0 | 1,9 | 6,0 | 11,4 | 0,190 | 0,176 |
| 6,83 | 1,9 | 6,0 | 11,4 | 0,197 | 0,148 |

IV.4 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS NA DISPERSÃO AXIAL

A importância do estudo destas variáveis está na identificação das condições ótimas de operação do equipamento. Os parâmetros estudados foram a vazão da corrente de fluido, a amplitude e a frequência de pulsação.

A caracterização da influência destas variáveis sobre o fenômeno da dispersão axial será realizada através de gráficos do número de dispersão versus o parâmetro, cuja influência deseja-se analisar, permitindo uma identificação mais realística do comportamento deste fenômeno no equipamento.

IV.4.1 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE ESCOAMENTO NA DISPERSÃO AXIAL

A vazão de operação é uma variável altamente influente no comportamento da dispersão axial, pois a velocidade com que o líquido escoar ao longo do equipamento está diretamente ligada a vazão de escoamento do fluido. Da mecânica dos fluidos, sabe-se que a velocidade de escoamento contribui para a definição do regime de fluxo (laminar ou turbulento). Do exposto, verifica-se a importância do estudo do efeito da vazão sobre o parâmetro de interesse, que é o número de dispersão. No caso em estudo, é importante ressaltar que o mecanismo de mistura é resultante do efeito combinado das condições de agitação imposta ao líquido e da turbulência, a qual está associada a vazão de alimentação do equipamento. As Figuras IV.09 a IV.12 mostram os gráficos do número de dispersão versus a vazão, tendo como parâmetro das curvas a frequência de pulsação.

Na figura IV.09 observa-se que para espaçamento e área livre grande o número de dispersão decresce para valores baixos da frequência de pulsação, isto é devido ao fato de não ser possível ter uma movimentação eficiente, o que conduz à formação de gotas grandes, que prejudicam a dispersão, principalmente para elevados valores da velocidade da corrente líquida, tendendo a um regime de fluxo empistonado. Já para frequências de pulsação elevadas, o efeito combinado da vazão e da velocidade de pulsação ocasiona um aumento na turbulência dentro do equipamento e, conseqüentemente, o crescimento do número de dispersão.

Já analisando-se as Figuras IV.10 a IV.12, verifica-se uma mudança em relação aos resultados apresentados na Figura IV.09. Nestes gráficos podemos observar que o número de dispersão aumenta com a vazão, isto deve-se ao fato do grau de turbulência aumentar devido ao efeito combinado da amplitude de pulsação, redução do espaçamento entre os pratos e da área livre de escoamento, que são diferentes das condições apresentadas na Figura anterior.

IV.4.2 - INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO NA DISPERSÃO AXIAL

A análise da influência da frequência de pulsação é realizada com o objetivo de interpretar o comportamento do fenômeno da dispersão no interior da coluna de extração. O número de dispersão está relacionado com o grau de mistura, que é resultante da turbulência provocada pelas condições de agitação e pela velocidade de escoamento do fluido.

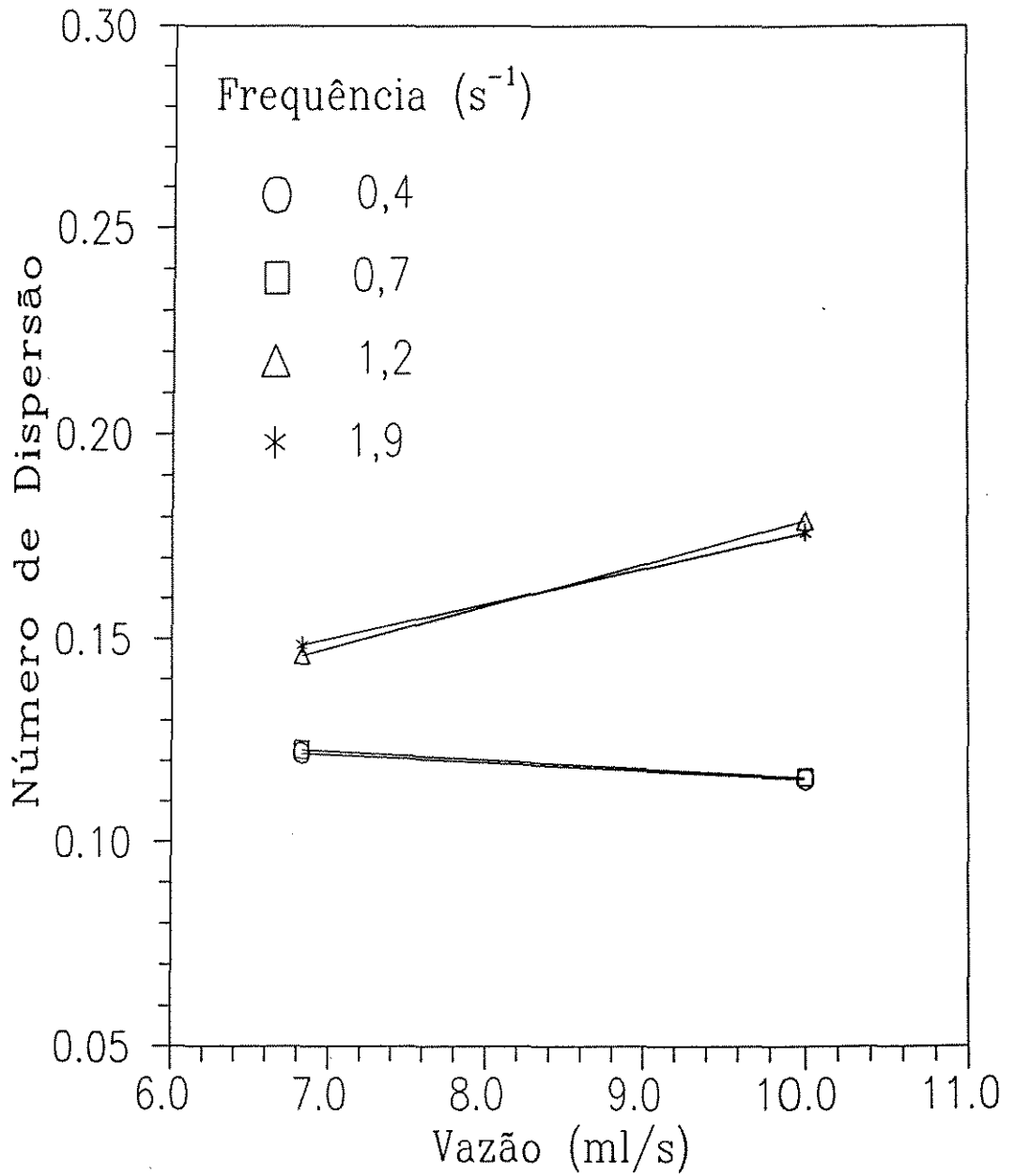


Figura IV.09 – Número de Dispersão vs Vazão

(L = 17 cm, A = 38 %, a = 6 cm)

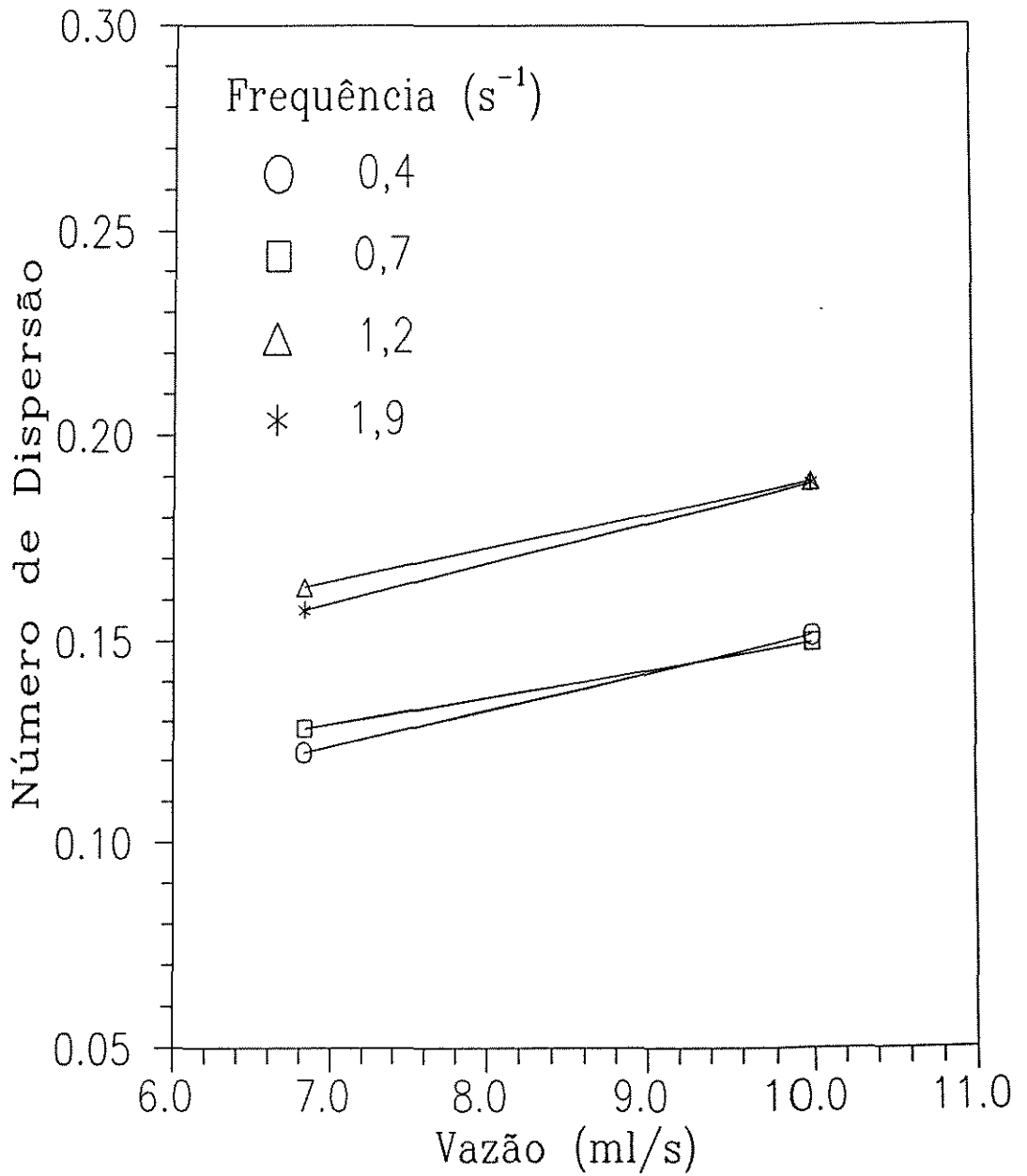


Figura IV.10 – Número de Dispersão vs Vazão

(L = 17 cm, A = 38 %, a = 8 cm)

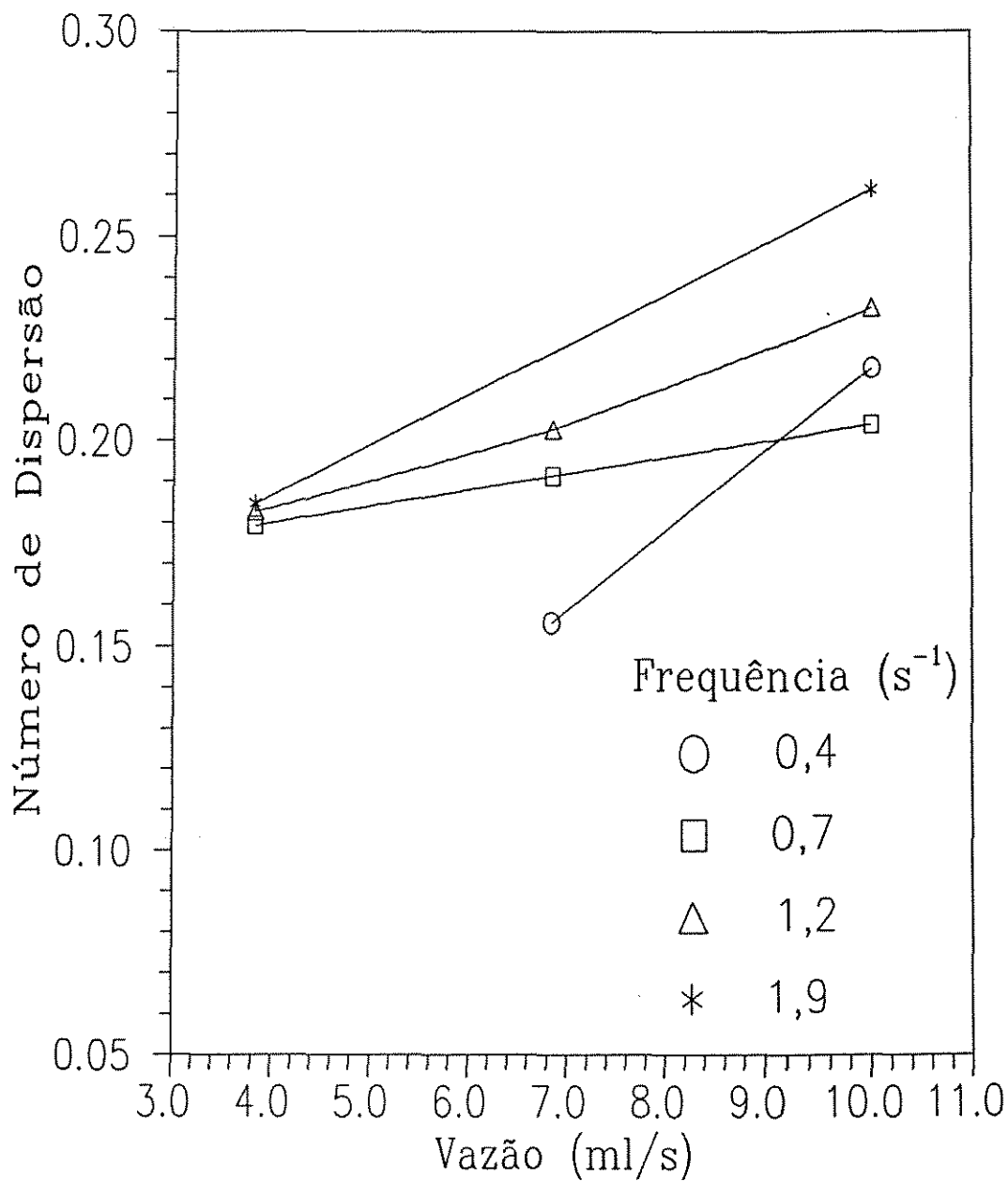


Figura IV.11 – Número de Dispersão vs Vazão

(L = 17 cm, A = 20 %, a = 8 cm)

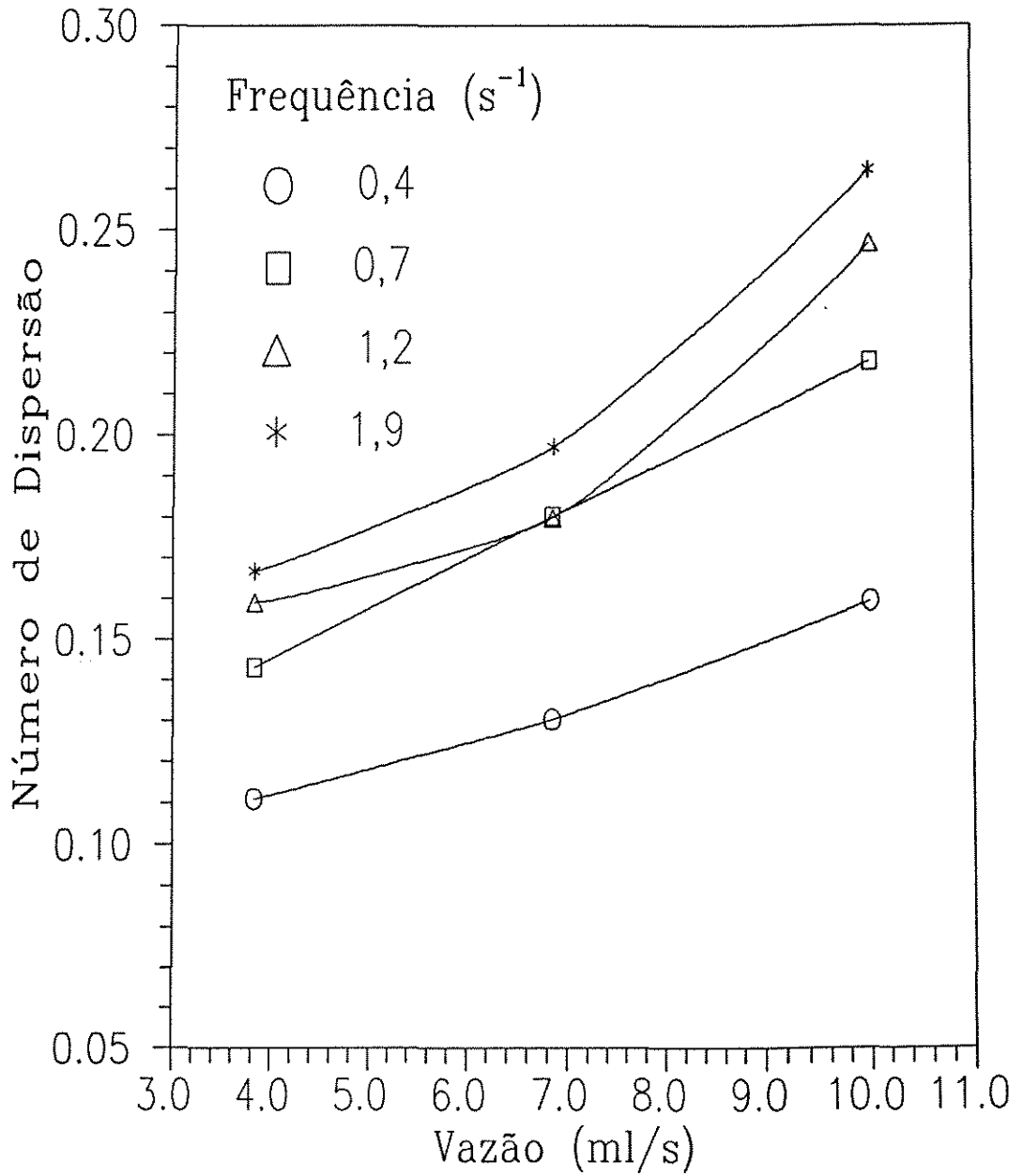


Figura IV.12 – Número de Dispersão vs Vazão

($L = 10$ cm, $A = 20$ %, $a = 6$ cm)

As condições de agitação envolvem a amplitude e a frequência de pulsação. Estas, por sua vez, estão relacionadas com a intensidade da formação de filetes quando o líquido atravessa os orifícios dos pratos. Assim, quanto maior for a velocidade de pulsação, mais intensa será a turbulência no interior do equipamento. Por isto, o estudo da frequência torna-se de grande importância para o estudo do comportamento do fenômeno da dispersão em colunas de pratos alternativos.

A faixa de frequências de pulsação estudada varia de 0,4 a 1,9 s⁻¹, com valores intermediários de 0,7 e 1,2 s⁻¹.

As Figuras IV.13 a IV.16 mostram os gráficos do número de dispersão versus a frequência de pulsação, tendo como parâmetro das curvas a vazão de escoamento.

Na Figura IV.13 observa-se que, para baixos valores da frequência de pulsação, o número de dispersão aumenta linearmente com esta variável. Isto deve-se provavelmente ao fato de que a quantidade de líquido situado entre os pratos é muito grande, não sendo possível toda a sua movimentação devido a baixa velocidade de agitação.

Para frequências mais elevadas observamos um decréscimo no número de dispersão. Essa tendência sistemática à diminuição do número de dispersão, para frequências de pulsação mais elevadas, não se verificou nas condições experimentais que envolveram o menor espaçamento entre os pratos, como mostra as Figuras IV.14 a IV.16. Nestas situações experimentais a formação de jatos é intensificada, o que favorece o fenômeno da dispersão. Nota-se nas Figuras IV.14 a IV.16 que o aumento da mistura torna-se mais significativo com o incremento da amplitude, o que provoca um maior turbilhonamento da camada de líquido e, conseqüentemente, uma maior mistura.

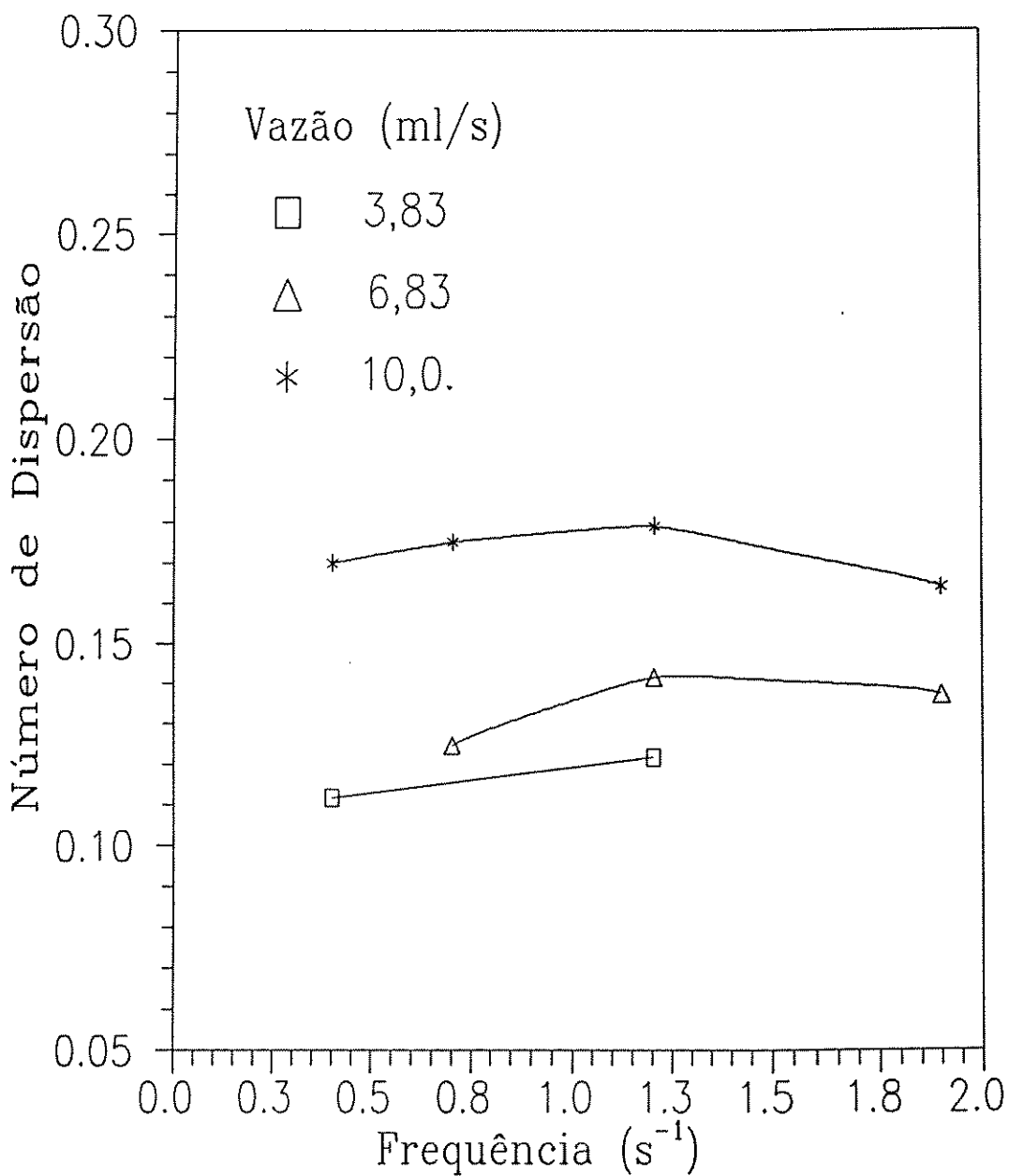


Figura IV.13 – Número de Dispersão vs Frequência

(L = 17 cm, A = 20 %, a = 4 cm)

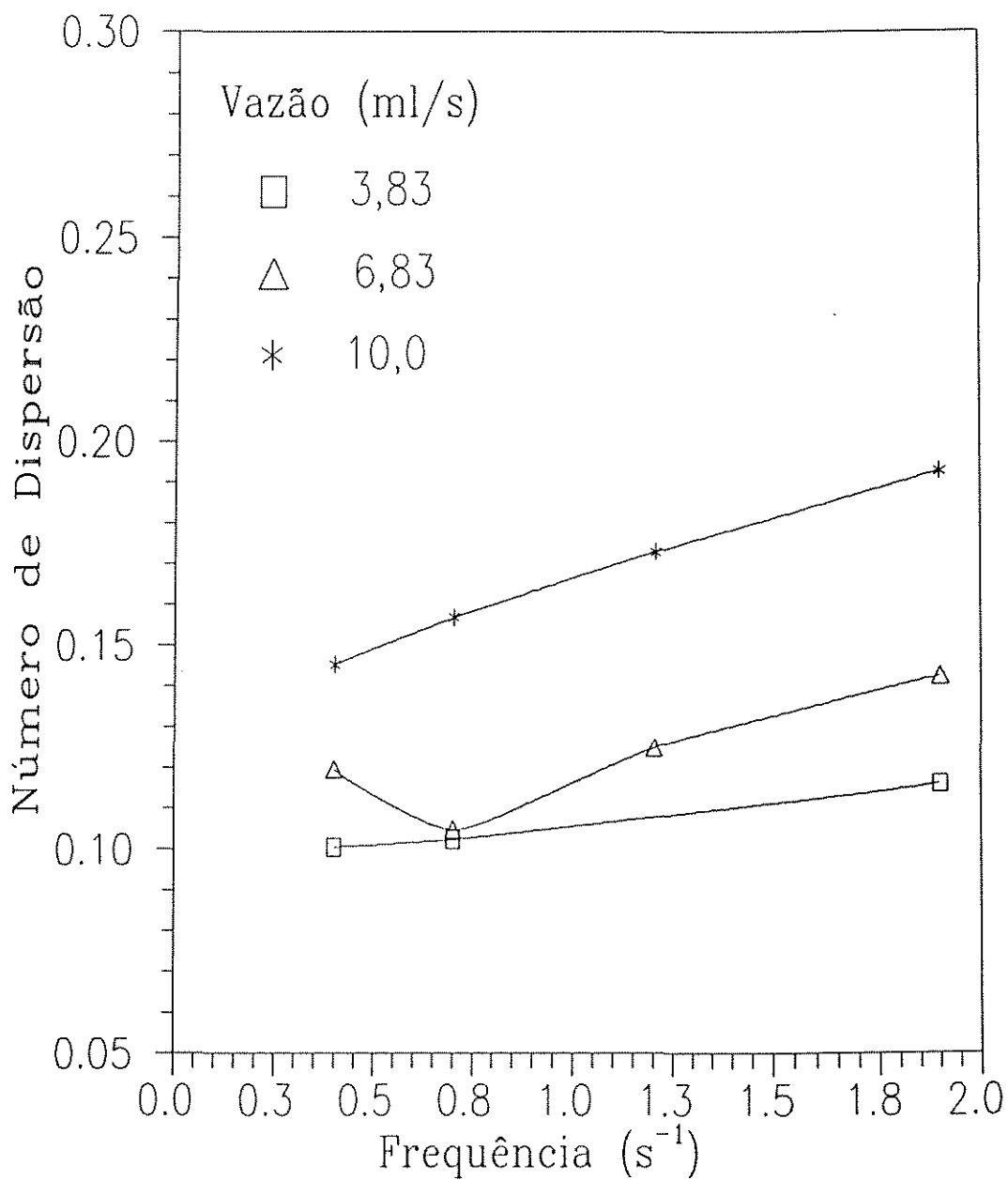


Figura IV.14 – Número de Dispersão vs Frequência

($L = 10$ cm, $A = 20$ %, $a = 4$ cm)

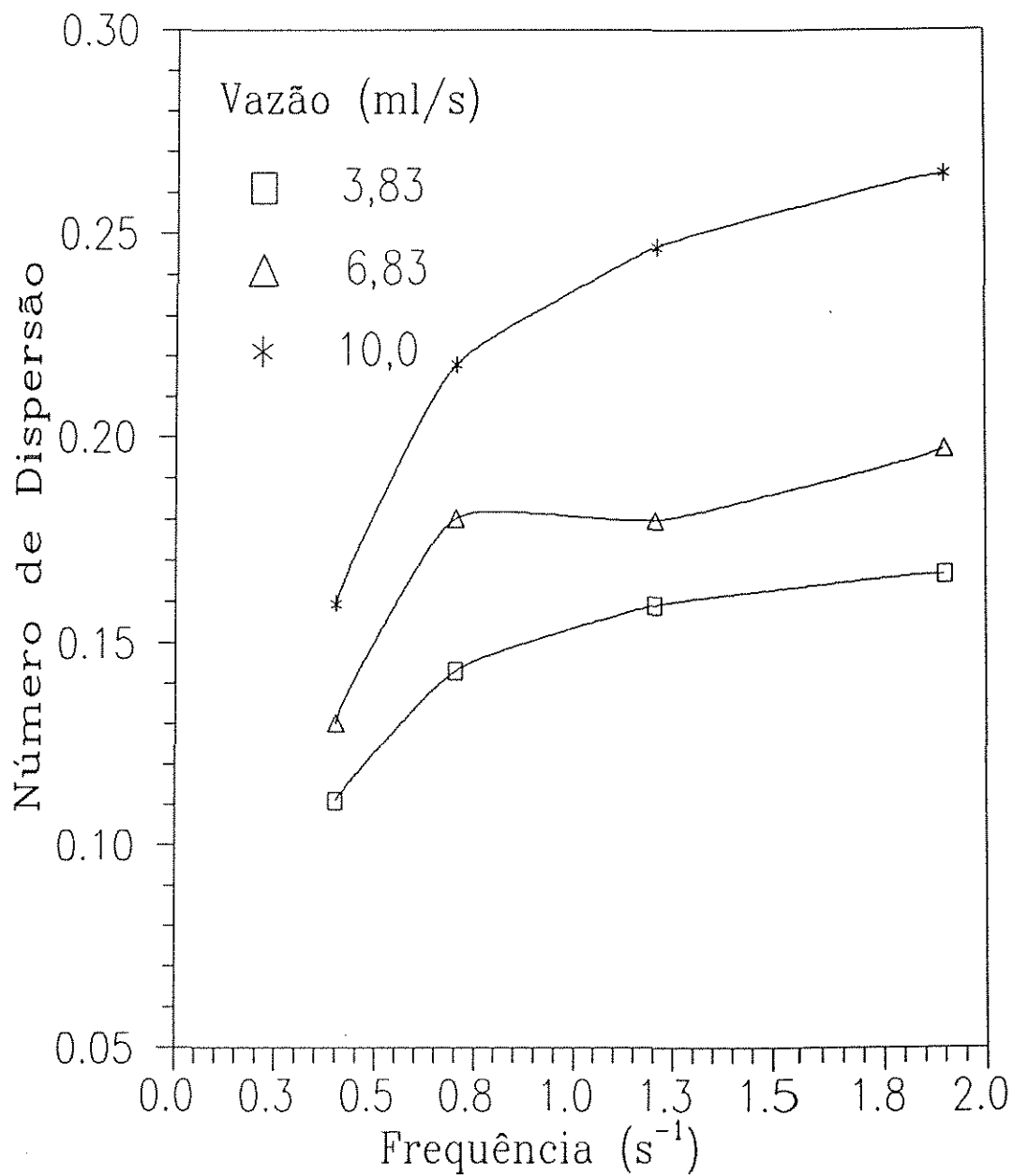


Figura IV.15 - Número de Dispersão vs Frequência

($L = 10$ cm, $A = 20$ %, $\sigma = 6$ cm)

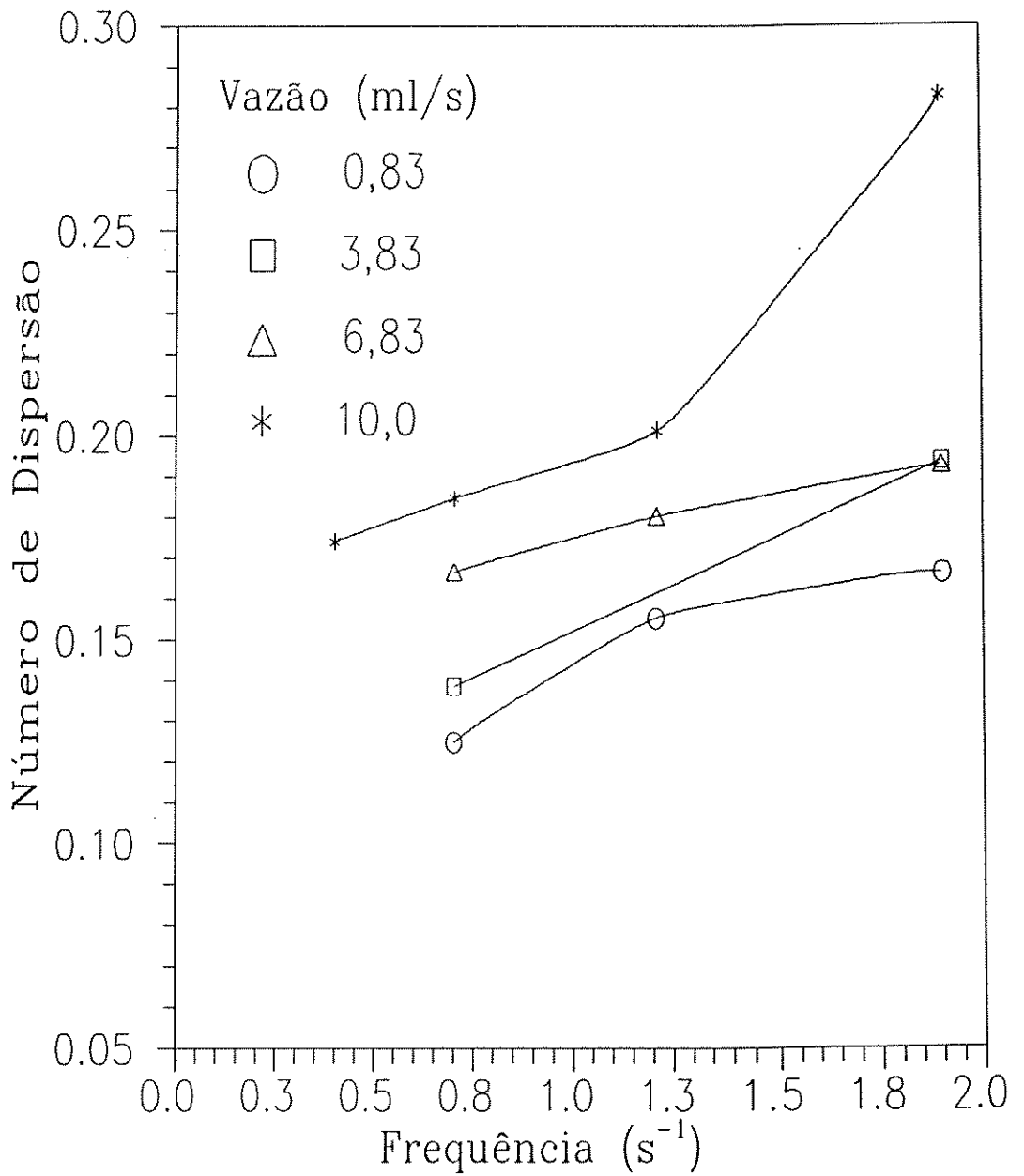


Figura IV.16 – Número de Dispersão vs Frequência

($L = 10$ cm, $A = 20$ %, $\alpha = 8$ cm)

IV.4.3 - INFLUÊNCIA DA AMPLITUDE DE PULSAÇÃO NA DISPERSÃO AXIAL

A amplitude de pulsação desempenha um papel similar ao da frequência, no que diz respeito à contribuição para a velocidade de pulsação. Conforme já citado em itens anteriores, a velocidade de pulsação é o principal elemento responsável pelo mecanismo de mistura no interior da coluna.

Os gráficos do número de dispersão em função a amplitude, mostrados nas Figuras IV.17 e IV.18, apresentam uma certa semelhança no comportamento. A amplitude de pulsação será interpretada em termos da energia de pulsação fornecida à massa líquida, a qual está diretamente ligada à velocidade de pulsação.

Pode-se notar que a maioria das curvas representadas nesses gráficos exibem uma tendência à passagem por um máximo, a menos da curva correspondente à frequência de $0,4 \text{ s}^{-1}$. Neste caso, a operação mostrou-se estável, com o número de dispersão aumentando com a amplitude de pulsação, o que não ocorreu nos demais casos, onde a presença do máximo dá indícios de um regime de operação instável. Esta instabilidade deve-se ao fato de que para elevadas amplitudes de pulsação o deslocamento do traçador é muito rápido, o qual conduz a um escoamento empistonado, prejudicial ao grau de dispersão.

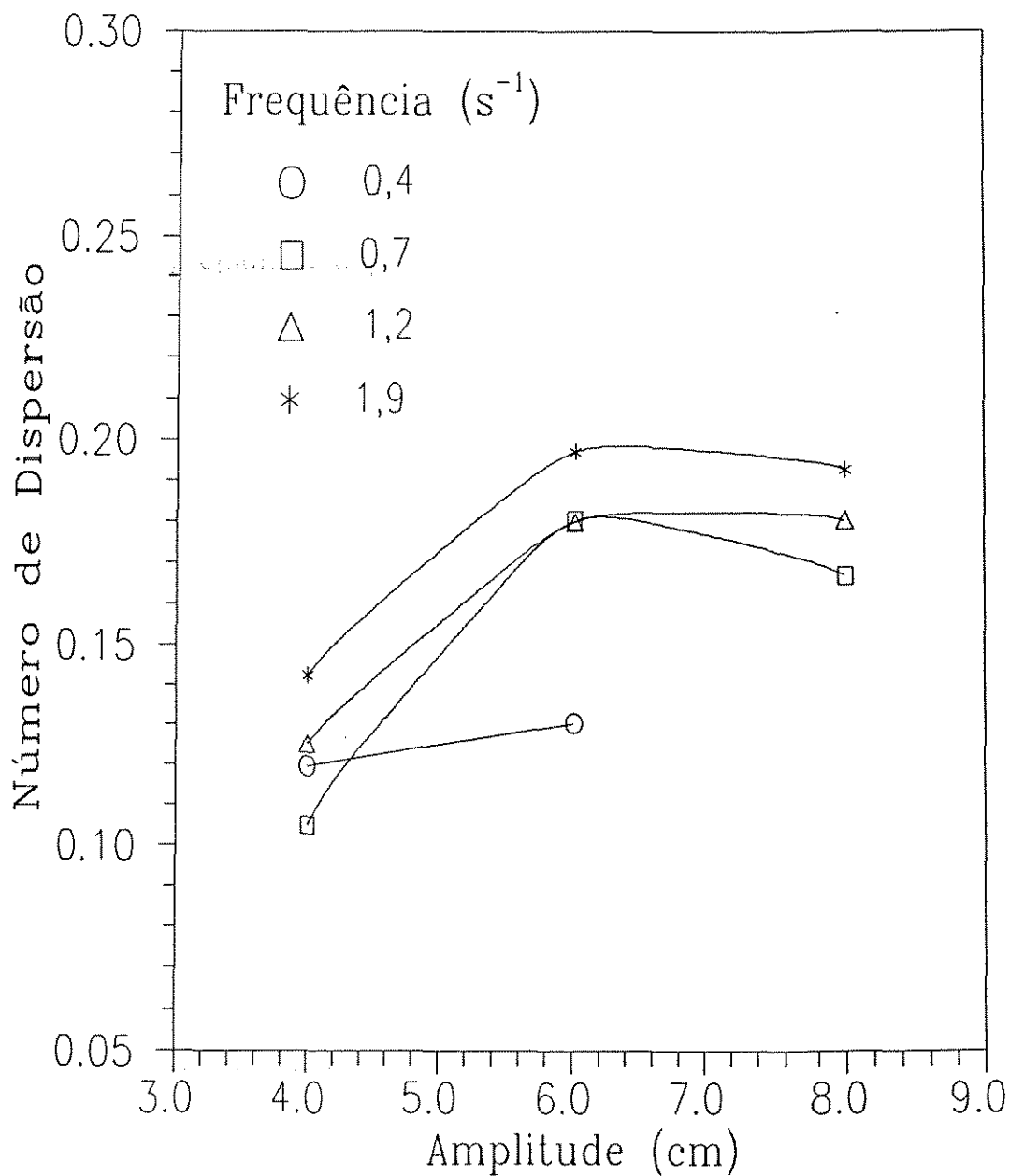


Figura IV.17 - Número de Dispersão vs Amplitude

($L = 10$ cm, $A = 20$ %, $Q = 6,83$ ml/s)

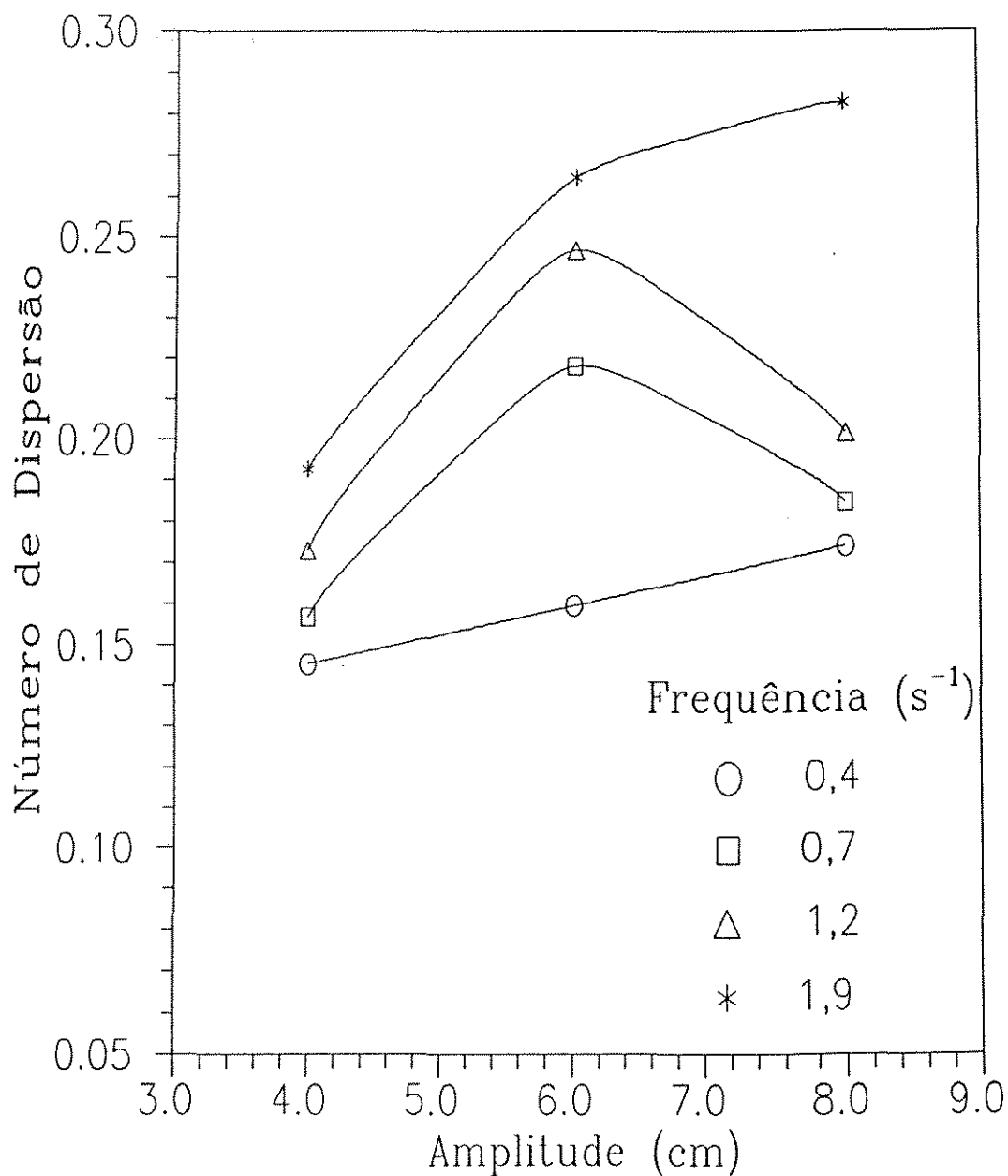


Figura IV.18 – Número de Dispersão vs Amplitude

($L = 10$ cm, $A = 20$ %, $Q = 10,0$ ml/s)

IV.5 - CONCLUSÃO

No presente capítulo foi realizado um estudo qualitativo do efeito do fluxo reverso sobre a dispersão, bem como, o estudo da influência das variáveis experimentais sobre o número de dispersão, com a finalidade de se obter uma melhor caracterização do coeficiente de dispersão axial.

Diante do que foi observado para as distintas variáveis estudadas, através dos gráficos do número de dispersão versus o parâmetro a ser analisado, possibilitou a análise da influência de cada variável independente sobre o fenômeno da dispersão.

A análise da influência do espaçamento entre os pratos revelou que um menor espaçamento; ou seja, um maior número de pratos conduziu a uma melhor dispersão do traçador no interior da coluna.

Um comportamento semelhante ao anterior foi observado no estudo da influência da fração de área livre sobre o número de dispersão, no qual a menor área aumentava a formação de filetes de líquido com velocidade diferente no seio da corrente, favorecendo o fenômeno da dispersão axial, em especial, para elevadas velocidades de agitação.

A vazão influenciou positivamente sobre o número de dispersão, em toda a faixa de operação estudada. Com o crescimento da vazão observa-se um aumento na dispersão axial.

No estudo da influência da amplitude e da frequência de pulsação, observamos que existem condições de agitação indesejáveis do ponto de vista operacional. No caso da amplitude intermediária, notamos que o número de dispersão apresentava um maior valor. Já para a frequência, deve-se evitar a operação em condições de maior espaçamento e baixa amplitude, pois para valores elevados da frequência de pulsação, acima de $1,2 \text{ s}^{-1}$, começa a existir uma redução no número de dispersão.

Muitas destas conclusões estão em concordância com as

apresentadas nos trabalhos de Kim e Baird (1976); Yong-Ho Yu e Kim (1987) e Matsumoto, Honma e Koga (1989).

Com o conhecimento da influência destas variáveis sobre o número de dispersão, torna-se mais fácil a identificação das condições operacionais que permitam o melhor funcionamento da coluna de extração proposta. Isto poderá contribuir para o projeto de um equipamento em escala de produção industrial, é claro que após a realização de estudos adicionais, referentes à expansão de escala ("scale-up").

CAPÍTULO V

MODELAGEM MATEMÁTICA

V.1 - INTRODUÇÃO

No presente trabalho, inicialmente fizemos uma breve descrição do processo de extração. Em seguida, no Capítulo II, foi dado ênfase às colunas de extração de fluxo pulsado e de pratos alternativos, bem como, um estudo do fenômeno da dispersão axial realizado por diversos pesquisadores.

No Capítulo III, descrevemos os detalhes envolvidos na montagem do equipamento, as alterações efetuadas, com a finalidade de uma melhor caracterização da dispersão axial. Já no Capítulo IV, apresentou-se uma análise dos resultados experimentais obtidos, visando caracterizar a influência de cada variável analisada, sobre o coeficiente de dispersão axial.

Neste Capítulo, iremos descrever todo o procedimento efetuado para a obtenção de uma correlação que descreva o fenômeno da dispersão axial, em uma coluna de extração de pratos alternativos, dando uma contribuição para o projeto do extrator em escala industrial.

V.2 - TÉCNICA DA ANÁLISE DIMENSIONAL

Na presente seção, descreveremos o método aplicado na determinação de uma correlação empírica que possibilite o cálculo do fenômeno da dispersão, e, conseqüentemente, o valor do coeficiente de dispersão axial, realizado com base nas condições experimentais e comparado com os dados obtidos via Modelo da Dispersão.

Esta técnica caracteriza-se pela combinação das variáveis que afetam o fenômeno, através da obtenção dos grupos adimensionais que descrevam o problema. Uma situação mais geral na qual a análise dimensional pode ser empregada com sucesso, é aquela na qual não existe uma equação diferencial que governe claramente o fenômeno. Em tal situação necessita-se de um procedimento mais geral, conhecido como Teorema Pi de Buckingham.

Neste trabalho será utilizado o Teorema Pi de Buckingham, o qual facilita a interpretação e estende o campo de aplicação dos dados experimentais. Este método permite que o fenômeno a ser estudado possa ser expresso em termos de grupos adimensionais, denominados de π_1 , π_2 , π_3 , π_4 , etc.

O Teorema Pi de Buckingham assegura que o comportamento do grupo adimensional de interesse pode ser determinado como uma função dos outros grupos, expresso pela equação V.1.

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_n) \quad (\text{V.1})$$

Assim, o grupo adimensional π_1 será expresso em função dos demais, os quais são determinados com base no conhecimento das condições experimentais.

V.3 - APLICAÇÃO DO TEOREMA PI DE BUCKINGHAM AO PROBLEMA FÍSICO PARA A DETERMINAÇÃO DOS GRUPOS ADIMENSIONAIS

O procedimento básico deste teorema será descrito, a medida que se fizer necessário, para a obtenção dos grupos adimensionais que regem o fenômeno.

A primeira etapa deste teorema consiste na listagem de todos os parâmetros que influenciam significativamente no fenômeno em estudo, resultando em n parâmetros. A seguir, temos a segunda etapa, na qual torna-se necessário a escolha de um conjunto de dimensões fundamentais adequadas ao problema. Estas podem ser expressa em termos do sistema de unidades MLT ou FLT. Na terceira etapa escrevemos as dimensões de todos os parâmetros em termos dessas dimensões fundamentais.

Na Tabela V.01 apresentamos a listagem de todos os parâmetros experimentais utilizados na adimensionalização com seu respectivo símbolo adotado e suas dimensões fundamentais, considerando o sistema de unidade MLT.

Neste caso, o número de variáveis geométricas e operacionais (n) é igual a 11, necessitando-se, portanto, da determinação do número de variáveis que comporão a base, o que será mostrado nos parágrafos subsequentes.

A construção da matriz dimensional é feita com o objetivo de se determinar m , que possibilitará o conhecimento do número de grupos adimensionais a ser determinados. A matriz mostrada a seguir é formada pelos expoentes das variáveis com relação a cada dimensão fundamental.

O valor de m corresponde ao maior determinante não nulo. Desta forma, o valor de m encontrado é igual a 3. Este é, portanto, o número de variáveis básicas ou repetidas.

Matriz Dimensional

| | | | | | | | | | | |
|---|----|---|---|---|--------|-------|----|-------|----|---|
| | E | H | D | L | ρ | μ | g | (a.f) | V | S |
| M | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| L | 2 | 1 | 1 | 1 | -3 | -1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| T | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -2 | -1 | -1 | 0 |

Tabela V.01 - Listagem dos Parâmetros Físicos com seus Símbolos e Dimensões Fundamentais Correspondentes

| Descrição dos Parâmetros | Símbolo | Dimensões |
|-------------------------------------|---------|-------------------|
| Coefficiente de Dispersão Axial | E | $L^2.T^{-1}$ |
| Altura da Coluna | H | L |
| Diâmetro da Coluna | D | L |
| Espaçamento dos Pratos | L | L |
| Área Livre de Escoamento | A | adimensional |
| Massa Específica | ρ | $M.L^{-3}$ |
| Viscosidade Dinâmica | μ | $M.L^{-1}.T^{-1}$ |
| Aceleração da Gravidade | g | $L.T^{-2}$ |
| Velocidade de Pulsação | (a.f) | $L.T^{-1}$ |
| Velocidade da Corrente | V | $L.T^{-1}$ |
| Área da Seção Transversal da Coluna | S | L^2 |

Na quarta etapa será feita a escolha das variáveis básicas, que serão repetidas na formulação dos grupos dimensionais. O número destas variáveis, como descrito anteriormente, será igual a 3. A escolha destas não deve ser aleatória. Isto evitará a obtenção de correlações incapazes de representar o problema físico. Uma técnica usualmente adotada é a que consiste na escolha de um conjunto de variáveis que envolva grandeza de caráter cinemático, outra envolvendo massa ou força e outra de caráter geométrico.

Desta forma, as variáveis básicas escolhidas foram: o espaçamento entre os pratos (L), a velocidade de pulsação (a.f) - que representa o produto da amplitude pela frequência - e a massa específica (ρ).

A próxima etapa consiste na formulação das equações dimensionais, combinando-se as variáveis básicas selecionadas anteriormente (quarta etapa) com cada um dos outros parâmetros, de maneira a formar grupos dimensionais. O número de grupos dimensionais é determinado pela subtração entre o número de parâmetros que influenciam (n) e a ordem do maior determinante não nulo da matriz dimensional (m). Isto resulta em 8 grupos dimensionais.

Efetuada a combinação das variáveis, obtemos as expressões para cada grupo dimensional, apresentados a seguir:

$$\pi_1 = L^a (a.f)^b \rho^c E \quad (V.2)$$

$$\pi_2 = L^a (a.f)^b \rho^c H \quad (V.3)$$

$$\pi_3 = L^a (a.f)^b \rho^c D \quad (V.4)$$

$$\pi_4 = L^a (a.f)^b \rho^c A \quad (V.5)$$

$$\pi_5 = L^a (a \cdot f)^b \rho^c \mu \quad (V.6)$$

$$\pi_6 = L^a (a \cdot f)^b \rho^c g \quad (V.7)$$

$$\pi_7 = L^a (a \cdot f)^b \rho^c V \quad (V.8)$$

$$\pi_8 = L^a (a \cdot f)^b \rho^c S \quad (V.9)$$

A solução das expressões V.2 a V.9 serão apresentados no Apêndice D, como também as simplificações efetuadas para a obtenção da seguinte correlação empírica genérica:

$$\frac{E}{V H} = W_1 \left[(A)^{W_2} \left(\frac{\mu}{\rho V L} \right)^{W_3} \left(\frac{L g}{(a f)^2} \right)^{W_4} \left(\frac{V}{a f} \right)^{W_5} \right] \quad (V.10)$$

Nesta correlação temos cinco grupos adimensionais. A seguir iremos esclarecer cada um destes grupos, através do significado físico.

$$\pi_1 = \frac{E}{V H} = \frac{1}{P} \quad (V.11)$$

Esta equação V.11 representa o grupo adimensional que fisicamente significa o grau de mistura axial no equipamento; ou seja, o número de dispersão, que também é conhecido como o inverso do número de Péclet. Este representa a razão entre o coeficiente de dispersão axial e o produto da velocidade da corrente pelo comprimento característico do equipamento.

$$\pi_2 = A \quad (\text{V.12})$$

Este grupo representa a fração total de área livre de escoamento no interior da coluna, ou seja, é a razão entre a área total dos furos e a área do prato. É de grande importância pois permite um maior ou menor escoamento no interior do equipamento.

$$\pi_3 = \left(\frac{\mu}{\rho v L} \right) = \frac{1}{R} \quad (\text{V.13})$$

Este grupo representa o inverso do número de Reynolds, o qual é um dos mais conhecidos na mecânica dos fluidos, pois, no caso de um escoamento sem agitação; é quem define se o mesmo é laminar ou turbulento.

$$\pi_4 = \frac{L g}{(a f)^2} \quad (\text{V.14})$$

O grupo adimensional dado pela equação V.14 é o termo que relaciona as energias envolvidas no equipamento. Ele representa a razão entre a energia de aceleração da gravidade e a energia de pulsação dos pratos, multiplicado pela razão do espaçamento entre os pratos e a amplitude de pulsação dos mesmos; ou seja, o espaço percorrido pelo prato na direção axial.

$$\pi_5 = \frac{v}{a f} \quad (\text{V.15})$$

Este grupamento deverá se apresentar na correlação a ser obtida,

como um dos mais importantes, isto porque o mesmo representa a razão entre a velocidade da corrente líquida e a velocidade de pulsação dos pratos.

V.4 - DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DA CORRELAÇÃO

O cálculo dos coeficientes W_1 a W_5 foram efetuados com a finalidade de ajustar a correlação genérica (equação V.10) a uma forma que descreva o fenômeno da dispersão axial, mediante o conhecimento das condições operacionais e características geométricas do equipamento.

Este ajuste foi realizado utilizando o método de otimização dos mínimos quadrados, que é largamente utilizado em problemas desta natureza. A função objetivo a ser minimizada, segundo este método, é dada por:

$$\varphi = \sum_{j=1}^m (E_{\text{exp}} - E_{\text{calc}})^2 \quad (\text{V.16})$$

A minimização da equação V.16 é idêntica a minimização da equação V.17, que nos permite uma boa simplificação dos cálculos em relação a anterior, pois este artifício nos possibilita a obtenção e resolução de equações lineares. A nova equação objetivo pode ser escrita da seguinte forma:

$$\varphi = \sum_{j=1}^m [\text{Ln}(E_{\text{exp}}) - \text{Ln}(E_{\text{calc}})]^2 \quad (\text{V.17})$$

Aplicando o logarítmo neperiano na equação V.10, obtemos a seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{Ln}\left(\frac{E}{V H}\right) &= \text{Ln}(W_1) + W_2 \text{Ln}(A) + W_3 \text{Ln}\left(\frac{\mu}{\rho V L}\right) + \\ &W_4 \text{Ln}\left(\frac{L g}{(a f)^2}\right) + W_5 \text{Ln}\left(\frac{V}{a f}\right) \end{aligned} \quad (\text{V.18})$$

Sendo:

$$\text{Ln}(E_{\text{calc}}) = \text{Ln}\left(\frac{E}{V H}\right) \quad (\text{V.19})$$

Na equação V.18 podemos observar que os coeficientes apresentam-se na forma linear e que estes possuem valores constantes. Substituindo esta na equação V.17 obtemos a seguinte função objetivo a ser minimizada.

$$\phi = \sum_{j=1}^m \left[\begin{array}{l} \text{Ln}(E_{\text{exp}}) - \text{Ln}(W_1) - W_2 \text{Ln}(A) - \\ W_3 \text{Ln}\left(\frac{\mu}{\rho V L}\right) - W_4 \text{Ln}\left(\frac{L g}{(a f)^2}\right) - W_5 \text{Ln}\left(\frac{V}{a f}\right) \end{array} \right] \quad (\text{V.20})$$

Para determinar o ponto de mínimo de uma função, é necessário que a derivada primeira da função objetivo a ser minimizada em relação a uma dada variável seja nula. Assim, efetuando-se os cálculos com a finalidade de se determinar a derivada da equação V.20 em relação as constantes empíricas W_1 a W_5 , obtemos um conjunto de equações lineares,

que é facilmente resolvida.

$$\frac{\partial \phi}{\partial (\text{Ln } w_1)} = 0 \rightarrow \sum_{j=1}^m \text{Ln}(E_{\text{calc}})_j = \sum_{j=1}^m \text{Ln}(E_{\text{exp}})_j \quad (\text{V.21})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial w_2} = 0 \rightarrow \sum_{j=1}^m [\text{Ln}(E_{\text{calc}}) \text{Ln}(A)]_j = \sum_{j=1}^m [\text{Ln}(E_{\text{exp}}) \text{Ln}(A)]_j \quad (\text{V.22})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial w_3} = 0 \rightarrow \sum_{j=1}^m \left[\text{Ln}(E_{\text{calc}}) \text{Ln}\left(\frac{\mu}{\rho V L}\right) \right]_j = \sum_{j=1}^m \left[\text{Ln}(E_{\text{exp}}) \text{Ln}\left(\frac{\mu}{\rho V L}\right) \right]_j \quad (\text{V.23})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial w_4} = 0 \rightarrow \sum_{j=1}^m \left[\text{Ln}(E_{\text{calc}}) \text{Ln}\left(\frac{L g}{(a f)^2}\right) \right]_j = \sum_{j=1}^m \left[\text{Ln}(E_{\text{exp}}) \text{Ln}\left(\frac{L g}{(a f)^2}\right) \right]_j \quad (\text{V.24})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial w_5} = 0 \rightarrow \sum_{j=1}^m \left[\text{Ln}(E_{\text{calc}}) \text{Ln}\left(\frac{v}{a f}\right) \right]_j = \sum_{j=1}^m \left[\text{Ln}(E_{\text{exp}}) \text{Ln}\left(\frac{v}{a f}\right) \right]_j \quad (\text{V.25})$$

Substituindo a equação V.18 em cada uma das equações V.21 a V.24, observamos que o sistema de equações é linear. A resolução deste sistema de equações foi desenvolvido através do Método de Gauss, utilizando-se o programa desenvolvido em linguagem Turbo Pascal, denominado de GAUSS, o qual consta no Apêndice C do presente trabalho. Obtendo-se os seguintes valores para as constantes:

$$W_1 = 1,00498$$

$$W_2 = 0,00055$$

$$W_3 = 0,00394$$

$$W_4 = -0,40016$$

$$W_5 = 0,41191$$

Após o conhecimento das constantes W_1 a W_5 , a equação V.10 assume a forma:

$$\frac{E}{V H} = 1,00498 \left[(A)^{0,00055} \left(\frac{\mu}{\rho V L} \right)^{0,00394} \left(\frac{L g}{(a f)^2} \right)^{-0,40016} \left(\frac{V}{a f} \right)^{0,41191} \right] \quad (V.26)$$

Observando-se os parâmetro desta correlação, nota-se que os grupamentos que relacionam a energia de aceleração da gravidade com a energia de pulsação dos pratos, e o grupamento que relaciona a velocidade da corrente líquida com a velocidade de pulsação dos pratos, são os que exercem maior influência na descrição do fenômeno da dispersão via correlação empírica.

A Figura V.01, mostrada a seguir, representa uma comparação entre os valores do número de dispersão calculados a partir da equação V.26 e o número de dispersão experimental.

Podemos observar nesta figura, que a correlação V.26 proposta, possibilita a obtenção de valores do número de dispersão, e, conseqüentemente do coeficiente de dispersão axial, em função dos parâmetros geométricos e das variáveis operacionais estudadas na coluna de extração de pratos alternativos.

A partir da Figura V.01 nota-se que a correlação é bastante representativa, com resultados aceitáveis, pois, mais de 70 % dos pontos calculados apresentam um erro menor que mais ou menos 25 %, em relação aos obtidos experimentalmente.

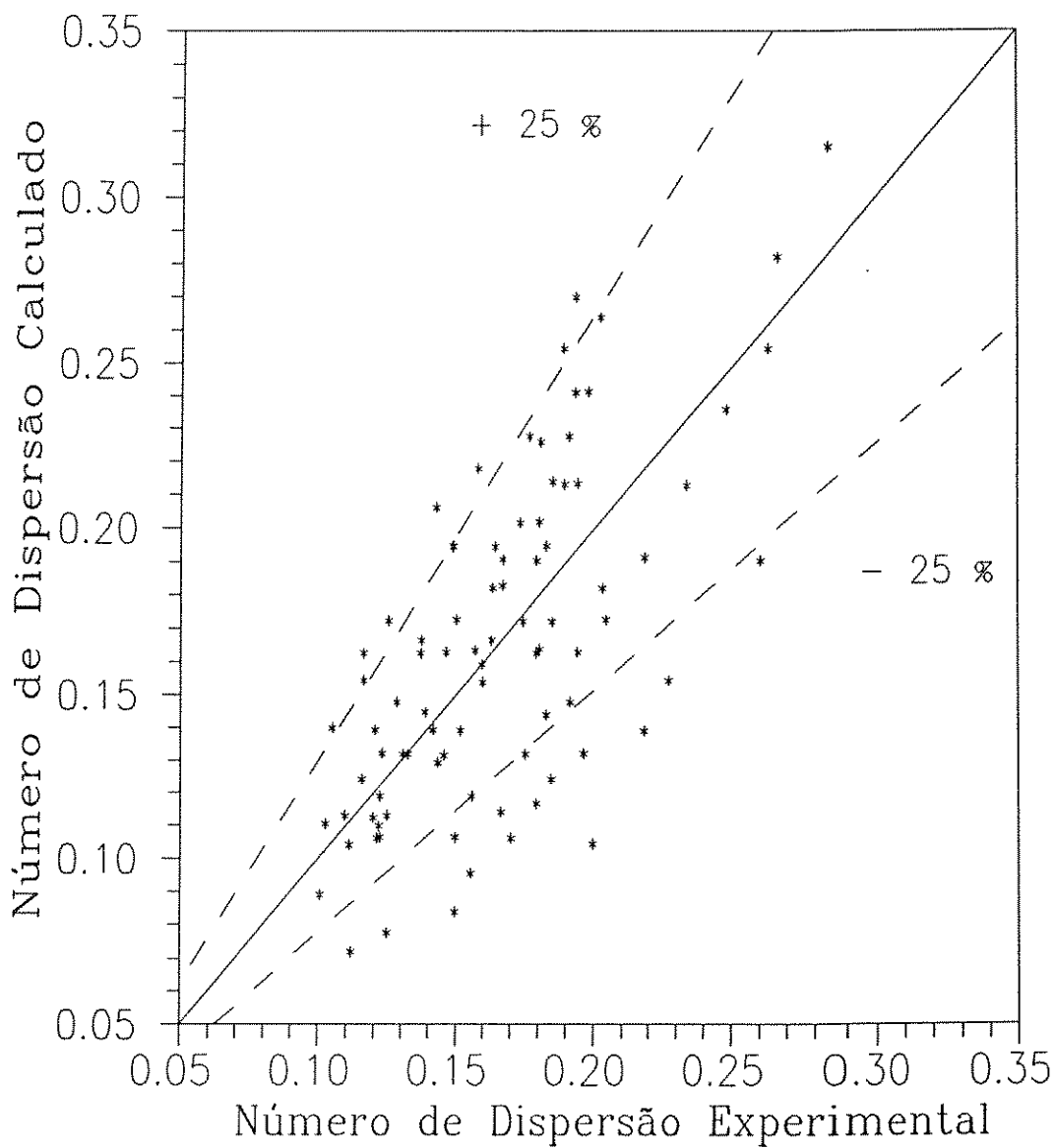


Figura V.01 – Correlação Proposta para o Cálculo do Número de Dispersão

V.5 - CONCLUSÃO

Neste capítulo, apresentamos o procedimento adotado com o objetivo de determinar uma correlação que descrevesse o fenômeno da dispersão axial. Desta forma, obtivemos a equação V.26, que permite o cálculo do número de dispersão numa coluna de extração de pratos alternativos.

Todas as variáveis estudadas, foram levadas em consideração, tornando fidedigna a equação V.26 obtida. Assim, conhecendo-se as variáveis operacionais e geométricas, é possível ter uma noção do efeito do coeficiente de dispersão axial. Este, por sua vez, é um parâmetro hidrodinâmico de grande importância para o projeto e operação do tipo de equipamento em estudo, visto que o mesmo introduz uma certa correção dos desvios da idealidade do complexo mecanismo de escoamento envolvido na operação de extração.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

No presente trabalho estudamos o comportamento do fenômeno da dispersão axial em uma coluna de extração de pratos alternativos. O estudo foi efetuado fazendo-se a combinação das variáveis geométricas e operacionais, tais como: o espaçamento entre os pratos (interligado ao número de pratos, pois o comprimento da coluna não foi alterado); a fração de área livre de escoamento; a vazão do fluido; a frequência e a amplitude de pulsação.

Com os resultados experimentais apresentados no Apêndice B, obtidos com base no procedimento descrito no Capítulo III, possibilitou-se a determinação do grau de mistura, através dos valores obtidos para o número de dispersão, via Modelo da Dispersão, também descrito no Capítulo III.

No Capítulo I do presente trabalho foi apresentada uma descrição sumária sobre o processo de extração e os equipamentos mais importantes desenvolvidos para serem utilizados neste processo. Como o objetivo deste estudo está particularmente relacionado com a caracterização do fenômeno da dispersão axial em colunas de extração de pratos alternativos, realizamos no Capítulo II uma apresentação da proposta inicial desenvolvida por Van Dijk (1935), para as colunas deste tipo, no qual se enquadra a coluna utilizada no presente trabalho. No Capítulo II, também foi apresentado um resumo dos principais estudos realizados para a dispersão axial nestes tipos de extratores, observando-se que as correlações mais simples foram as de Kim e Baird (1976), para uma coluna de pratos alternativos, e a de Yong-Hu e Kim (1987), para uma coluna de fluxo pulsado, sendo que estas não envolvem um bom número de parâmetros, tornando perigoso o uso destas em projetos de escala industrial. A maioria das correlações do capítulo apresentam a dependência para com o fenômeno de retenção da fase dispersa ("holdup") e/ou para com a transferência de massa, os quais, por sua vez sofrem influência da dispersão.

No Capítulo III apresentamos a descrição da montagem, do

funcionamento e do método de obtenção dos resultados experimentais numa coluna de extração de pratos alternativos em escala laboratorial. Neste capítulo também foi realizada uma descrição do método utilizado para a determinação do número de dispersão com base nos resultados experimentais, os quais serão utilizados para a validação da correlação empírica a ser proposta.

Uma análise da presença de fluxo reverso no interior do equipamento e a avaliação da influência de cada variável experimental sobre o comportamento do número de dispersão foram realizados no Capítulo IV, através de uma análise gráfica. As observações mais notáveis para cada variável experimental serão descritas a seguir.

A influência do espaçamento entre os pratos sobre o número de dispersão é fortemente dependente da velocidade de agitação, a qual determina a quantidade de filetes de líquido, com velocidade diferente do restante da massa líquida, no interior da coluna. É importante resaltar que o espaçamento entre os pratos está diretamente ligado ao número de pratos, uma vez que o comprimento da coluna não foi alterado, sendo que, para baixas velocidades de pulsação, é desejável um maior espaçamento entre os pratos a fim de obter um crescimento no grau de mistura. O mesmo não ocorre quando a velocidade de pulsação é elevada, pois neste caso um menor espaçamento favorece ao fenômeno da dispersão.

A influência da área livre de escoamento sobre o comportamento do número de dispersão apresentou a mesma tendência para as diversas situações apresentadas, ou seja, para todas as combinações de variáveis experimentais analisadas, podemos observar que uma menor área livre de escoamento favorece o fenômeno da dispersão. Isto deve-se provavelmente a uma maior circulação do traçador em cada estágio devido à restrição de fluxo ocasionada. Esta redução apresenta-se mais significativa quando a velocidade de pulsação e a vazão do líquido são elevadas.

A vazão de operação é uma variável altamente influente no coeficiente de dispersão axial, pois esta é quem determina a velocidade da corrente líquida, a qual pode ou não aumentar o efeito da turbulência no equipamento, resultante do efeito combinado desta velocidade com a velocidade de pulsação (condição de agitação) imposta ao líquido. Dentro da faixa de operação estudada observamos que o grau de mistura é diretamente proporcional à vazão, para qualquer valor das demais condições experimentais estudadas.

A intensidade de formação de filetes de líquido no seio da corrente, quando o mesmo atravessa os orifícios dos pratos, está relacionado com a frequência de pulsação. Neste comportamento observa-se que, para condições de baixa agitação, não é aconselhável a operação do equipamento, pois não é possível efetuar uma boa mistura, já que uma grande massa líquida situa-se entre os pratos, a qual está ligada ao espaçamento entre os mesmos. Essa tendência não foi observada para condições experimentais que envolveram um menor espaçamento entre os pratos.

A amplitude de pulsação, em conjunto com a frequência, representam a velocidade de pulsação, que é responsável pelo mecanismo de mistura no interior da coluna. Este parâmetro será analisado com relação à velocidade de pulsação. Para baixos valores desta (frequência igual a $0,4 \text{ s}^{-1}$), observa-se um crescimento do número de dispersão com a amplitude. Já para valores da velocidade de pulsação elevados, nota-se que, a partir da amplitude intermediária (melhor valor para o número de dispersão, dentre os valores estudados), o grau de dispersão existente no equipamento decresce, isto devido ao fato de que um maior deslocamento dos pratos no sentido longitudinal conduz a uma rápida movimentação do traçador do ponto de injeção até o ponto de amostragem, conduzindo o escoamento, em termos do grau de mistura, a um regime do tipo empistonado.

No Capítulo V deste trabalho apresentamos a descrição da modelagem matemática do fenômeno da dispersão axial em uma coluna de extração de pratos alternativos. Este estudo envolveu a obtenção de uma correlação empírica com base nas condições experimentais já descritas, através do Teorema Pi de Buckingham. Os valores obtidos através desta correlação (número de dispersão calculado) foram comparados com resultados obtidos pelo Modelo da Dispersão (número de dispersão experimental), utilizando os dados experimentais.

A correlação empírica obtida poderá ser utilizada para prever o número de dispersão, e por conseguinte, o coeficiente de dispersão axial, dentro da faixa de validade da mesma. O conhecimento deste parâmetro é de grande importância para se ter um conhecimento mais real dos outros fenômenos envolvidos no processo de extração, possibilitando o projeto e a operação de extratores de pratos alternativos mais eficientes e seguros.

Uma vez que é praticamente impossível a obtenção de um trabalho totalmente completo, torna-se importante aqui a apresentação de algumas sugestões que, quando desenvolvidas e associadas a este trabalho, possam contribuir cientificamente para o melhor esclarecimento acerca deste tipo de equipamento.

Desta forma, iremos apresentar as seguintes sugestões:

- Um estudo sobre a influência do comprimento e do diâmetro da coluna, possibilitando o projeto deste tipo de equipamento ("scale-up");
- Extender o estudo que foi realizado para um escoamento monofásico com água, para outros líquidos, como também, uma avaliação do grau de mistura para um escoamento bifásico, com diferentes sistemas líquidos;
- Avaliar novas condições experimentais, obtendo-se subsídios para uma avaliação mais precisa das variáveis analisadas e, em especial, do espaçamento entre os pratos e da área livre de escoamento, ampliando-se

cada vez mais a faixa de aplicabilidade da correlação obtida;

- O estudo do coeficiente de dispersão axial realizado neste tipo de coluna é apenas um dentre diversos outros estudos que podem ser realizados em equipamentos deste tipo. Assim, torna-se de grande importância a avaliação de retenção da fase dispersa ("holdup") e da transferência de massa nestes equipamentos.

O estudo realizado no presente trabalho, somado aos que podem ser desenvolvidos, permitirá um conhecimento da hidrodinâmica da coluna de extração de pratos alternativos, possibilitando seu uso em escala industrial sem os problemas de segurança e eficiência.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baird, M. H. I., Rao, R. e Vijayan, S.. Axial Mixing and Mass Transfer in a Vibrating Perforated Plate Extraction Column. The Canadian Journal of Chem. Eng., 70: 69 - 76,1992.
- Bischoff, K. B. e Levenspiel, O.. Fluid Dispersion - Generalization and Comparasion of Mathematical Models - I. Generalization of Models. Chemical Engeneering Science, 17: 245 - 255, 1962.
- Dongaonkar, K. R., Pratt, H. R. C. e Stevens, G. W.. Mass Transfer and Axial Dispersion in a Kuhni Extraction Column. AIChE Journal, 37(5): 694 - 704, 1991.
- Hafez, M. M., Baird, H. I. e Nirdosh, I.. Flooding and Axial Dispersion in Reciprocating Plate Extraction Columns. The Canadian Journal of Chem. Eng., 57: 150 - 158, 1979.
- Hanson, C.. Recent Advances in Liquid-Liquid Extraction, Pergamon Press, 1971.
- Kim, S. D. e Baird, M. H. I.. Axial Dispersion in a Reciprocating Plate Extraction Column. The Canadian Journal of Chem. Eng., 54: 81 - 89, 1976.
- Levenspiel, O.. Engenharia das Reações Químicas - Cálculo de Reatores. 2^a ed., vol. 2, Editora Edgard Blucher, 1974.
- Levenspiel, O. e Smith, W. K.. Notes on the Difusion - Type Model for the Longitudinal Mixing of Fluids in Flow. Chem. Eng. Sci., 6: 227 - 233, 1957.

- Lo, T. C., Baird, M. H. I. e Hanson, C.. Handbook of Solvent Extraction. John Wiley & Sons, 1982.
- Matsumoto, S., Honma, S. e Koga, J.. Short Note : Axial Dispersion Coefficient and Mass Transfer Rate in Pulsed Column. Journal of Nuclear Sci. and Technology, 26(4): 473 - 474, 1989.
- Mecklenburgh, J. C. e Hartland, S.. The Theory of Backmixing. John Wiley & Sons, 1975.
- Miyauchi, T. e Oya, H.. Longitudinal Dispersion in Pulsed Perforated-Plate Columns. AIChE Journal, 11(3): 395 - 402, 1964.
- Miyauchi, T. e Vermeulen, T.. Longitudinal Dispersion in Two-Phase Continuous-Flow Operations. I&EC Fundamentals, 2(2): 113 - 125, 1963a.
- Miyauchi, T. e Vermeulen, T.. Diffusion and Back-Flow Models for Two-Phase Axial Dispersion. I&EC Fundamentals, 2(4): 304 - 309, 1963b.
- Novotny, P., Prochazha, J. e Landau, J.. Longitudinal Mixing in Reciprocating and Pulsed Sieve-Plate Column-Single Phase Flow. The Canadian Journal of Chem. Eng., 18: 405 - 410, 1970.
- Prvcic, L. M., Pratt, H. R. e Stevens, G. W.. Axial Dispersion in Pulsed, Perforated-Plate Extraction Columns. AIChE Journal, 35(11): 1845 - 1855, 1989.

- Sehmel, G. A. e Babb, A. L.. Longitudinal Mixing Studies in a Pulsed Extraction Column. I&EC Process Design and Development, 3(3): 211 - 214, 1964.
- Sleicher, C. A. Jr.. Axial Mixing and Extraction Efficiency. AIChE Journal, 5: 145-149, 1959.
- Steiner, L., Kumar, A. e Hartland, S.. Determination and Correlation of Axial-Mixing Parameters in an Agitated Liquid-Liquid Extraction Column. The Canadian Journal of Chem. Eng., 66: 241 - 247, 1988.
- Tojo, K., Miyunami, K. e Yano, T.. Axial Mixing in a Multistage Vibrating Disc Column with Countercurrent. The Chem. Eng. Journal, 11: 101 - 104, 1976.
- Van Dijck, W. J. O., U. S.. Patent 2,011.186; 1935.
- Yu, Yong-Ho e Kim, S. D.. Axial Dispersion, Holdup and Flooding Characteristics in Pulsed Extraction Columns. The Canadian Journal of Chem. Eng., 65(5): 752 - 758, 1987.

APÊNDICE A

CURVAS DE CALIBRAÇÃO

Neste apêndice iremos apresentar a listagem dos resultados que serviram de base para a construção da curva de calibração do rotâmetro e do espectrofotometro.

Os resultados da curva de calibração posição do flutuador versus vazão de água, foi obtida através de um procedimento simples, que consiste inicialmente no ajuste do flutuador, para em seguida ser efetuada a coleta do fluxo líquido durante um dado período de tempo. Em seguida era medida e anotada o seu volume, sendo esta a vazão de escoamento para uma dada posição do flutuador, determinada pela razão entre o volume medido e o intervalo de tempo. De posse destes resultados (Tabela A.01) é possível a construção da curva de calibração do respectivo instrumento.

O procedimento adotado para a obtenção dos resultados objetivando a construção da curva de calibração transmitância versus concentração da solução de alaranjado de metila, basea-se na medida da transmitância de soluções com concentração conhecida do traçador (solução padrão de alaranjado de metila), através de um espectrofotometro com comprimento de onda adequado. A partir destes valores de transmitância e concentração (Tabela A.02) é construída a curva de calibração para o respectivo instrumento.

Tabela A.01 - Resultados para a Construção da Curva de Calibração
Posição do Flutuador versus Vazão de Água

| Posição do Flutuador | Volume (ml) | Tempo (s) | Vazão (ml/s) |
|----------------------|-------------|-----------|--------------|
| 1 | 40 | 60 | 0,67 |
| 2 | 50 | 60 | 0,83 |
| 3 | 205 | 60 | 3,41 |
| 4 | 230 | 60 | 3,83 |
| 5 | 330 | 60 | 5,50 |
| 6 | 410 | 60 | 6,83 |
| 7 | 505 | 60 | 8,42 |
| 8 | 300 | 30 | 10,00 |
| 9 | 350 | 30 | 11,67 |
| 10 | 400 | 30 | 13,33 |
| 11 | 295 | 20 | 14,75 |
| 12 | 330 | 20 | 16,50 |

Tabela A.02 - Resultados para a Construção da Curva de Calibração
Transmitância versus Concentração da Solução de
Alaranjado de Metila

| Transmitância (%) | Concentração . 10 ⁶ (g/ml) |
|-------------------|---------------------------------------|
| 100 | 1,69 |
| 98 | 2,15 |
| 95 | 2,87 |
| 90 | 4,11 |
| 85 | 5,42 |
| 80 | 6,82 |
| 75 | 8,30 |
| 70 | 9,89 |
| 65 | 11,6 |
| 60 | 13,4 |
| 55 | 15,4 |
| 50 | 17,6 |
| 45 | 20,0 |
| 40 | 22,7 |

APÊNDICE B

RESULTADOS OBTIDOS

Neste apêndice, iremos apresentar os resultados experimentais obtidos para a transmitância, os quais serviram de base na determinação do coeficiente de dispersão axial. Esta apresentação será feita sob a forma de tabela, constituída pelas seguintes colunas: Tempo e Transmitância medida no espectrofotometro.

A determinação da concentração é feita via curva de calibração (descrito no capítulo III), de posse destes resultados podemos determinar o coeficiente de dispersão axial para cada situação experimental estudada.

Nas Tabelas B.01 a B.87, cada uma representa a medida da transmitância do traçador durante um dado intervalo de tempo até que esta não fosse mais detectável. Isto é realizado para as mais diversas condições operacionais, possibilitando um estudo mais eficiente sobre o fenômeno da dispersão axial.

Tabela B.01

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Transmitância (%) | 100 | 87 | 82 | 81 | 83 | 86 | 92 | 100 |

Tabela B.02

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Transmitância (%) | 100 | 87 | 80 | 76 | 74 | 76 | 88 | 100 |

Tabela B.03

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Transmitância (%) | 100 | 91 | 87 | 85 | 84 | 87 | 90 | 100 |

Tabela B.04

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Transmitância (%) | 100 | 89 | 83 | 83 | 85 | 91 | 95 | 100 |

Tabela B.05

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 0,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Transmitância (%) | 100 | 93 | 87 | 82 | 85 | 85 | 92 | 100 |

Tabela B.06

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Transmitância (%) | 100 | 93 | 85 | 87 | 90 | 95 | 98 | 100 |

Tabela B.07

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Transmitância (%) | 100 | 80 | 76 | 79 | 87 | 93 | 96 | 100 |

Tabela B.08

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Transmitância (%) | 100 | 85 | 80 | 80 | 85 | 90 | 96 | 100 |

Tabela B.09

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Transmitância (%) | 100 | 90 | 85 | 86 | 86 | 89 | 90 | 100 |

Tabela B.10

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Transmitância (%) | 100 | 83 | 80 | 84 | 90 | 94 | 95 | 100 |

Tabela B.11

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 0,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 93 | 85 | 81 | 75 | 75 | 78 | 89 | 100 |

Tabela B.12

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 83 | 77 | 78 | 80 | 86 | 92 | 96 | 100 |

Tabela B.13

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 82 | 74 | 78 | 85 | 91 | 94 | 97 | 100 |

Tabela B.14

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 82 | 77 | 77 | 80 | 84 | 91 | 96 | 100 |

Tabela B.15

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 77 | 76 | 80 | 87 | 92 | 94 | 97 | 100 |

Tabela B.16

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 81 | 74 | 79 | 83 | 88 | 91 | 96 | 100 |

Tabela B.17

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 93 | 87 | 76 | 75 | 76 | 80 | 90 | 100 |

Tabela B.18

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 98 | 78 | 73 | 77 | 83 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.19

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 91 | 79 | 74 | 77 | 80 | 87 | 94 | 100 |

Tabela B.20

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 91 | 74 | 75 | 77 | 85 | 91 | 96 | 100 |

Tabela B.21

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 98 | 81 | 75 | 82 | 89 | 94 | 97 | 100 |

Tabela B.22

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 91 | 82 | 81 | 85 | 90 | 92 | 96 | 100 |

Tabela B.23

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 95 | 82 | 83 | 87 | 92 | 96 | 98 | 100 |

Tabela B.24

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 95 | 79 | 74 | 79 | 85 | 91 | 95 | 100 |

Tabela B.25

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 95 | 84 | 80 | 84 | 85 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.26

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 98 | 95 | 69 | 72 | 83 | 89 | 95 | 100 |

Tabela B.27

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 92 | 79 | 78 | 84 | 89 | 91 | 95 | 100 |

Tabela B.28

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 99 | 77 | 66 | 67 | 81 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.29

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 86 | 71 | 72 | 78 | 85 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.30

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 97 | 85 | 81 | 81 | 89 | 87 | 94 | 100 |

Tabela B.31

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 95 | 85 | 84 | 87 | 91 | 94 | 97 | 100 |

Tabela B.32

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 93 | 78 | 79 | 84 | 89 | 94 | 97 | 100 |

Tabela B.33

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 93 | 77 | 76 | 81 | 86 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.34

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 72 | 71 | 80 | 86 | 87 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.35

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Transmitância (%) | 100 | 82 | 77 | 79 | 82 | 85 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.36

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 0,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 84 | 79 | 78 | 79 | 81 | 80 | 82 | 90 | 100 |

Tabela B.37

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 95 | 81 | 77 | 77 | 79 | 83 | 89 | 95 | 100 |

Tabela B.38

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 82 | 78 | 79 | 82 | 83 | 84 | 87 | 93 | 100 |

Tabela B.39

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 90 | 80 | 83 | 85 | 87 | 90 | 93 | 96 | 100 |

Tabela B.40

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 82 | 84 | 89 | 90 | 92 | 93 | 96 | 98 | 100 |

Tabela B.41

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 97 | 85 | 79 | 76 | 76 | 78 | 80 | 90 | 100 |

Tabela B.42

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 96 | 81 | 75 | 76 | 80 | 83 | 86 | 93 | 100 |

Tabela B.43

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 94 | 74 | 73 | 79 | 84 | 89 | 93 | 96 | 100 |

Tabela B.44

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 94 | 84 | 82 | 82 | 83 | 84 | 87 | 93 | 100 |

Tabela B.45

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 90 | 85 | 82 | 84 | 87 | 90 | 92 | 96 | 100 |

Tabela B.46

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 90 | 83 | 83 | 87 | 92 | 94 | 95 | 97 | 100 |

Tabela B.47

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 93 | 85 | 83 | 84 | 86 | 87 | 89 | 94 | 100 |

Tabela B.48

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 93 | 83 | 85 | 86 | 88 | 90 | 94 | 97 | 100 |

Tabela B.49

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 88 | 82 | 85 | 90 | 92 | 95 | 96 | 97 | 100 |

Tabela B.50

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 91 | 85 | 84 | 85 | 85 | 87 | 89 | 94 | 100 |

Tabela B.51

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 90 | 84 | 85 | 86 | 90 | 90 | 94 | 97 | 100 |

Tabela B.52

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 88 | 84 | 87 | 90 | 95 | 96 | 97 | 99 | 100 |

Tabela B.53

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 99 | 91 | 86 | 84 | 82 | 84 | 88 | 94 | 100 |

Tabela B.54

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 97 | 87 | 82 | 83 | 85 | 89 | 91 | 95 | 100 |

Tabela B.55

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 92 | 80 | 80 | 85 | 89 | 93 | 95 | 97 | 100 |

Tabela B.56

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 100 | 99 | 95 | 90 | 87 | 85 | 86 | 93 | 100 |

Tabela B.57

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 95 | 91 | 84 | 79 | 78 | 84 | 85 | 92 | 100 |

Tabela B.58

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 100 | 89 | 81 | 83 | 90 | 95 | 98 | 99 | 100 |

Tabela B.59

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 100 | 95 | 90 | 86 | 83 | 82 | 85 | 92 | 100 |

Tabela B.60

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 100 | 97 | 87 | 83 | 83 | 85 | 89 | 94 | 100 |

Tabela B.61

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 93 | 77 | 74 | 78 | 83 | 89 | 92 | 96 | 100 |

Tabela B.62

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 100 | 92 | 86 | 85 | 85 | 88 | 92 | 96 | 100 |

Tabela B.63

$L = 10 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 98 | 86 | 83 | 87 | 93 | 94 | 96 | 98 | 100 |

Tabela B.64

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 99 | 93 | 77 | 77 | 79 | 84 | 89 | 95 | 100 |

Tabela B.65

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 83 | 75 | 75 | 80 | 82 | 86 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.66

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 83 | 72 | 74 | 75 | 78 | 83 | 89 | 95 | 100 |

Tabela B.67

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 97 | 75 | 75 | 78 | 82 | 85 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.68

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 85 | 74 | 74 | 75 | 79 | 85 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.69

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 75 | 65 | 66 | 70 | 76 | 79 | 87 | 93 | 100 |

Tabela B.70

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 70 | 65 | 63 | 73 | 71 | 85 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.71

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 100 | 95 | 85 | 82 | 78 | 79 | 87 | 94 | 100 |

Tabela B.72

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 91 | 77 | 72 | 80 | 81 | 86 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.73

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 90 | 71 | 75 | 77 | 80 | 86 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.74

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 99 | 89 | 79 | 78 | 78 | 80 | 87 | 94 | 100 |

Tabela B.75

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 97 | 82 | 74 | 70 | 72 | 77 | 85 | 93 | 100 |

Tabela B.76

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 98 | 91 | 75 | 72 | 76 | 85 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.77

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 96 | 92 | 74 | 69 | 70 | 72 | 80 | 89 | 100 |

Tabela B.78

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 10,0 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 95 | 88 | 73 | 72 | 78 | 84 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.79

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 97 | 84 | 80 | 82 | 86 | 89 | 94 | 97 | 100 |

Tabela B.80

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 99 | 85 | 77 | 75 | 77 | 84 | 89 | 95 | 100 |

Tabela B.81

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 8 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 99 | 93 | 77 | 77 | 79 | 84 | 89 | 95 | 100 |

Tabela B.82

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 99 | 92 | 81 | 77 | 80 | 80 | 91 | 96 | 100 |

Tabela B.83

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 38 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 93 | 75 | 74 | 74 | 76 | 82 | 88 | 94 | 100 |

Tabela B.84

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 6 \text{ cm}$; $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$; $Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 96 | 83 | 81 | 80 | 82 | 84 | 89 | 95 | 100 |

Tabela B.85

$L = 17 \text{ cm}$; $A = 20 \%$; $a = 4 \text{ cm}$; $f = 1,2 \text{ s}^{-1}$; $Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 98 | 84 | 78 | 79 | 81 | 85 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.86

 $L = 17 \text{ cm}; A = 20 \%; a = 4 \text{ cm}; f = 1,9 \text{ s}^{-1}; Q = 6,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 96 | 86 | 76 | 76 | 79 | 83 | 90 | 95 | 100 |

Tabela B.87

 $L = 17 \text{ cm}; A = 20 \%; a = 8 \text{ cm}; f = 1,9 \text{ s}^{-1}; Q = 3,83 \text{ ml/s}$

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Tempo (s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Transmitância (%) | 100 | 82 | 74 | 76 | 77 | 79 | 80 | 88 | 95 | 100 |

APÊNDICE C

PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

Neste apêndice, apresentaremos a listagem completa dos principais programas de computador desenvolvidos em linguagem Turbo Pascal e utilizados no presente trabalho.

O programa DISPERSA tem como função principal o cálculo do coeficiente de dispersão axial, baseando-se nos dados experimentais da transmitância. Este cálculo é realizado utilizando-se equações e um método numérico adequado (como descrito no capítulo III). Além deste cálculo, este programa nos permite o conhecimento da concentração para cada amostra coletada via curva de calibração do espectrofotometro.

O programa GAUSS tem por finalidade o ajuste dos coeficientes da correlação genérica. Isto é realizado utilizando-se o Método de Gauss.

Listagem do Programa DISPERSA

```

PROGRAM DISPERSA;
{ Este programa permite o cálculo do Coeficiente de Dispersão Axial,
  a partir dos dados da transmitância, utilizando-se as equações do
  Modelo da Dispersão }
USES CRT, PRINTER;
{ Definição das Variáveis }
TYPE VETOR = ARRAY [0..10] OF REAL;
CONST
  A = -0.0001;
  B = 0.0003;
  ALTURA = 97;      { cm }
  AREACOL = 23.758; { cm2 }
  D = 5.5;          { cm }
VAR
  CONC, TEMPO, TRANSMIT : VETOR;
  I, N, OPCA0, AMPL, DISCOS, VAZAO : INTEGER;
  S1, S2, S3, SIGMAT2, SIGMA2, AREA : REAL;
  FREQ, DISP, VELOC, DVL, Q, T2BARRA : REAL;
  AUX : CHAR;
{ Funções Desenvolvidas }
FUNCTION SOMA1(CONC : VETOR; N : INTEGER) : REAL;
{ Calcula o somatório da concentração }
VAR
  I : INTEGER;
BEGIN
  S1 := 0;
  FOR I := 0 TO (N-1) DO

```

```
        S1 := S1 + CONC[I];
    SOMA1 := S1;
END;

FUNCTION SOMA2(CONC, TEMPO : VETOR; N : INTEGER) : REAL;
{ Calcula o somatório da concentração vezes o tempo }
VAR
    I : INTEGER;
BEGIN
    S2 := 0;
    FOR I := 0 TO (N-1) DO
        S2 := S2 + TEMPO[I] * CONC[I];
    SOMA2 := S2;
END;

FUNCTION SOMA3(CONC, TEMPO : VETOR; N : INTEGER) : REAL;
{ Calcula o somatório da concentração vezes o tempo ao quadrado }
VAR
    I : INTEGER;
BEGIN
    S3 := 0;
    FOR I := 0 TO (N-1) DO
        S3 := S3 + SQR(TEMPO[I]) * CONC[I];
    SOMA3 := S3;
END;

FUNCTION COEFICIENTE (SIGMA2 : REAL) : REAL;
{ Calcula por tentativa e erro o coeficiente de dispersão }
VAR
    AUX, EXPRESSAO, COEF : REAL;
BEGIN
    COEF := SIGMA2 / 2;
```

```
EXPRESSAO := 0;
WHILE ABS(EXPRESSAO - SIGMA2) > 0.001 DO
BEGIN
    EXPRESSAO := 2 * COEF - 2 * SQR(COEF) *
        (1 - EXP(-1/COEF));
    IF (EXPRESSAO > SIGMA2 + 0.001) OR
        (EXPRESSAO < SIGMA2 - 0.001) THEN
    BEGIN
        IF EXPRESSAO < SIGMA2 THEN
            COEF := COEF + COEF / 10;
        IF EXPRESSAO > SIGMA2 THEN
            COEF := COEF - COEF / 10;
    END;
    COEFICIENTE := COEF;
END;

FUNCTION CURVA(TRANSMIT : VETOR; I : INTEGER) : REAL;
{ Calcula as concentrações adimensionais através da curva de calibração }
VAR
    AUX : REAL;
BEGIN
    AUX := (- LN(TRANSMIT[I]) + 4.67859) / 43499.8;
    CURVA := AUX / 0.005;
END;

{ INICIO DO PROGRAMA PRINCIPAL }
BEGIN
    { Entrada de Dados }
    CLRSCR;
    WRITELN;
    WRITE('Indique o Numero de Dados de Entrada = ');
```

```

READLN(N);
FOR I := 0 TO (N-1) DO
BEGIN
    TEMPO[I] := 60 * I;    { Tempo em Segundos }
    WRITE('Tempo[',I,'] Transmitancia[',I,'] = ');
    READLN(TRANSMIT[I]);
END;

{ Calculo da Concentração Adimensional }
FOR I := 0 TO (N-1) DO
    CONC[I] := CURVA(TRANSMIT, I);
{ Início do Cálculo do Coeficiente de Dispersão }
SIGMAT2 := SOMA3(CONC, TEMPO, N-1)/SOMA1(CONC, N-1) -
    SQR(SOMA2(CONC, TEMPO, N-1)/SOMA1(CONC, N-1));
T2BARRA := SQR(SOMA2(CONC, TEMPO, N-1)/
    SOMA1(CONC, N-1));
SIGMA2 := (SIGMAT2 / T2BARRA);
{ Entrada de Parâmetros }
WRITELN;
WRITE('QUAL O NUMERO DE DISCOS      = ');
READLN(DISCOS);
WRITE('QUAL A AREA LIVRE DE ESCOAMENTO (%) = ');
READLN(AREA);
REPEAT
BEGIN
    WRITELN('AMPLITUDES: 1 - MINIMA (4 cm),
        2 - INTERMEDIARIA (6 cm), 3 - MAXIMA (8 cm)');
    WRITE('QUAL A AMPLITUDE DE PULSACAO  = ');
    READLN(AMPL);
END;

```

```
UNTIL (AMPL = 1) OR (AMPL = 2) OR (AMPL = 3);
WRITE('QUAL A FREQUENCIA DE PULSACAO   = ');
READLN(FREQ);
REPEAT
BEGIN
  WRITELN('VAZOES: 2 = 0,83 ml/s, 4 = 3,83ml/s,
        6 = 6,83 ml/s, 8 = 10,0 ml/s');
  WRITE('QUAL A VAZAO DE ESCOAMENTO   = ');
  READLN(VAZAO);
  IF (VAZAO <> 2) AND (VAZAO <> 4) AND (VAZAO <> 6)
    AND (VAZAO <> 8) THEN
    WRITELN(' VAZAO INEXISTENTE !! ');
END;
UNTIL (VAZAO = 2) OR (VAZAO = 4) OR (VAZAO = 6)
  OR (VAZAO = 8);
IF VAZAO = 2 THEN
  Q := 0.83      { ml/s }
ELSE
  IF VAZAO = 4 THEN
    Q := 3.83    { ml/s }
  ELSE
    IF VAZAO = 6 THEN
      Q := 6.83  { ml/s }
    ELSE
      IF VAZAO = 8 THEN
        Q := 10.0; { ml/s }
      { Cálculo da Velocidade do Fluido }
      VELOC := Q / AREACOL;
      { Cálculo do Coeficiente de Dispersão }
```

```
DVL := COEFICIENTE(SIGMA2);
DISP := DVL * VELOC * ALTURA;
WRITELN;
WRITELN('VALOR DO NUMERO DE DISPERSAO = ',DVL:1:5);
WRITELN;
WRITELN('COEFICIENTE DE DISPERSAO   = ',DISP:3:4);
REPEAT UNTIL KEYPRESSED;
{ Saída dos Dados para Impressora }
WRITELN(LST);
WRITELN(LST,':10,CONDICOES DE OPERACAO');
WRITELN(LST);
WRITELN(LST,':15, DISCOS, 'DISCOS');
WRITELN(LST,':15, AREA:2:1, '% AREA LIVRE');
IF AMPL = 1 THEN
    WRITELN(LST,':15, AMPLITUDE MINIMA');
ELSE
    IF AMPL = 2 THEN
        WRITELN(LST,':15, AMPLITUDE INTERMEDIARIA');
    ELSE
        IF AMPL = 3 THEN
            WRITELN(LST,':15, AMPLITUDE MAXIMA');
WRITELN(LST,':15, 'FREQUENCIA = ', FREQ:1:1);
WRITELN(LST,':15, 'VAZAO = ', Q:4:2, 'ml/s');
WRITELN(LST); WRITELN(LST);
WRITELN(LST, 'VALOR DO NUMERO DE DISPERSAO = ', DVL:1:5);
WRITELN(LST);
WRITELN(LST, 'COEFICIENTE DE DISPERSAO AXIAL = ', DISP:3:4);
END.
```

Listagem do Programa GAUSS

```
PROGRAM GAUSS;
{ Programa para Resolver um Sistema de Equações Lineares
  pelo Método de Gauss, Calculando os Parâmetros de uma
  Correlação Empírica e Determinando o Coeficiente de
  Correlação e o Erro Relativo Médio }
USES CRT, PRINTER;
{ Definição das Variáveis }
TYPE
  REGISTRO = RECORD E : REAL;
    DVL : REAL;
    H : REAL;
    L : REAL;
    D : REAL;
    A : REAL;
    N : REAL;
    RO : REAL;
    G : REAL;
    MI : REAL;
    AM : REAL;
    Q : REAL;
    F : REAL;
  END;
  ARQUIVO = FILE OF REGISTRO;
  VETOR = ARRAY[1..5] OF DOUBLE;
  MATRIZ = ARRAY[1..5,1..6] OF DOUBLE;
VAR
  I, J, N, NS : INTEGER;
```



```
AREAC, SX, SY, SXY, SX2, SY2, CC,ERROIMP : DOUBLE;
ERROMA, ERROME, ERROPARC, EREL, AUX1 : DOUBLE;
T1, T2, T3, T4, T5, ECALC, AUX1, ERROAUX : DOUBLE;
B : VETOR;
M : MATRIZ;
NOMEGER, NOMEAUX : STRING[13];
TEXTO : TEXT;
REG : REGISTRO;
REGIS : ARQUIVO;
{ Rotina do Método da Eliminação de Gauss }
PROCEDURE GAUSS(N, NS : INTEGER; VAR A : MATRIZ);
VAR
  I, 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;
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;
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
```

```

        II := I - 1;
    FOR J := 1 TO II DO
        A[J,K] := A[J,K] - A[I,K] * A[J,I];
    END;
END;
END;
END;
{ INICIO DO PROGRAMA PRINCIPAL }
BEGIN
    CLRSCR;
    WRITELN; WRITELN;
    { Abertura dos Arquivos }
    WRITELN(' :20,'DIGITE OS NOMES DOS ARQUIVOS');
    WRITELN; WRITELN;
    WRITE(' :5,'Nome do Arquivo Tipo Registro = ');
    READLN(NOMEGER);
    WRITELN;
    WRITE(' :5,'Nome do Arquivo a ser Criado = ');
    READLN(NOMEAUX);
    WRITELN;
    ASSIGN(REGIS,NOMEGER);
    ASSIGN(TEXTO,NOMEAUX);
    RESET(REGIS);
    REWRITE(TEXTO);
    { Inicialização das Variáveis }
    N := 5;
    NS := 1;
    SX := 0;
    SY := 0;
```

```
SXY := 0;
SX2 := 0;
SY2 := 0;
CC := 0;
ERROMA := -9999;
ERROME := 99999;
ERROPARC := 0;
ERROIMP := 0;
EREL := 0;
FOR I := 1 TO N DO
BEGIN
  FOR J := 1 TO (N + 1) DO
    M[I,J] := 0;
  B[I] := 0;
END;
{ Calculos Iniciais - Formação da Matriz }
AREAC := (3.14 * SQR(5.5)) / 4;
M[1,1] := FILESIZE(REGIS);
REPEAT
BEGIN
  READ(REGIS,REG);
  M[1,2] := M[1,2] + LN(REG.A);
  M[1,3] := M[1,3] + LN(REG.MI/(REG.RO *
    (REG.Q/AREAC) * REG.L));
  M[1,4] := M[1,4] + LN((REG.L * REG.G)/
    (SQR(REG.AM * REG.F)));
  M[1,5] := M[1,5] + LN((REG.Q/AREAC)/(REG.AM *
    REG.F));
  B[1] := B[1] + LN(REG.DVL);
```

$$M[2,2] := M[2,2] + \text{LN}(\text{REG.A}) * \text{LN}(\text{REG.A});$$

$$M[2,3] := M[2,3] + \text{LN}(\text{REG.A}) * \text{LN}(\text{REG.MI}/(\text{REG.RO} * (\text{REG.Q}/\text{AREAC}) * \text{REG.L}));$$

$$M[2,4] := M[2,4] + \text{LN}(\text{REG.A}) * \text{LN}((\text{REG.L} * \text{REG.G})/(\text{SQR}(\text{REG.AM} * \text{REG.F})));$$

$$M[2,5] := M[2,5] + \text{LN}(\text{REG.A}) * \text{LN}((\text{REG.Q}/\text{AREAC})/(\text{REG.AM} * \text{REG.F}));$$

$$B[2] := B[2] + \text{LN}(\text{REG.A}) * \text{LN}(\text{REG.DVL});$$

$$M[3,3] := M[3,3] + \text{LN}(\text{REG.MI}/(\text{REG.RO} * (\text{REG.Q}/\text{AREAC}) * \text{REG.L})) * \text{LN}(\text{REG.MI}/(\text{REG.RO} * (\text{REG.Q}/\text{AREAC}) * \text{REG.L}));$$

$$M[3,4] := M[3,4] + \text{LN}(\text{REG.MI}/(\text{REG.RO} * (\text{REG.Q}/\text{AREAC}) * \text{REG.L})) * \text{LN}((\text{REG.L} * \text{REG.G})/(\text{SQR}(\text{REG.AM} * \text{REG.F})));$$

$$M[3,5] := M[3,5] + \text{LN}(\text{REG.MI}/(\text{REG.RO} * (\text{REG.Q}/\text{AREAC}) * \text{REG.L})) * \text{LN}((\text{REG.Q}/\text{AREAC})/(\text{REG.AM} * \text{REG.F}));$$

$$B[3] := B[3] + \text{LN}(\text{REG.MI}/(\text{REG.RO} * (\text{REG.Q}/\text{AREAC}) * \text{REG.L})) * \text{LN}(\text{REG.DVL});$$

$$M[4,4] := M[4,4] + \text{LN}((\text{REG.L} * \text{REG.G})/(\text{SQR}(\text{REG.AM} * \text{REG.F}))) * \text{LN}((\text{REG.L} * \text{REG.G})/(\text{SQR}(\text{REG.AM} * \text{REG.F})));$$

$$M[4,5] := M[4,5] + \text{LN}((\text{REG.L} * \text{REG.G})/(\text{SQR}(\text{REG.AM} * \text{REG.F}))) * \text{LN}((\text{REG.Q}/\text{AREAC})/(\text{REG.AM} * \text{REG.F}));$$

$$B[4] := B[4] + \text{LN}((\text{REG.L} * \text{REG.G})/(\text{SQR}(\text{REG.AM} * \text{REG.F}))) * \text{LN}(\text{REG.DVL});$$

$$M[5,5] := M[5,5] + \text{LN}((\text{REG.Q}/\text{AREAC})/(\text{REG.AM} * \text{REG.F})) * \text{LN}((\text{REG.Q}/\text{AREAC})/(\text{REG.AM} * \text{REG.F}));$$

$$B[5] := B[5] + \text{LN}((\text{REG.Q}/\text{AREAC})/(\text{REG.AM} * \text{REG.F}));$$

```

        REG.F)) * LN(REG.DVL);
END;
UNTIL EOF(REGIS);
CLOSE(REGIS);
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;
    M[N,(N + 1)] := B[N];
    GAUSS(N, NS, M);
    CLRSCR;
    WRITELN(' :20,'PARAMETROS DA CORRELACAO');
    WRITELN;
    WRITELN(' :25,'W[1] = ', EXP(M[1,(N + 1)]):7:5);
    WRITELN;
    WRITELN(' :25,'W[2] = ', EXP(M[2,(N + 1)]):7:5);
    WRITELN;
    WRITELN(' :25,'W[3] = ', EXP(M[3,(N + 1)]):7:5);
    WRITELN;
    WRITELN(' :25,'W[4] = ', EXP(M[4,(N + 1)]):7:5);
    WRITELN;
    WRITELN(' :25,'W[5] = ', EXP(M[5,(N + 1)]):7:5);
    { Impressão no Arquivo Tipo Texto }
    WRITELN(TEXTO,'Experi','',Ecalcul','',Erro %','',
        ' T1 T2 T3 T4 T5');
    WRITELN(TEXTO);
    { Calculos Estatisticos }

```

```
RESET(REGIS);
REPEAT
BEGIN
  READ(REGIS,REG);
  T1 := EXP(M[1,6]);
  T2 := EXP(M[2,6] * LN(REG.A));
  T3 := EXP(M[3,6] * LN(REG.MI/(REG.RO *
    (REG.Q/AREAC) * REG.L)));
  T4 := EXP(M[4,6] * LN((REG.L * REG.G)/SQR(REG.AM *
    REG.F)));
  T5 := EXP(M[5,6] * LN((REG.Q/AREAC)/(REG.AM *
    REG.F)));
  ECALC := (T1 * T2 * T3 * T4 * T5);
  SX := SX + REG.DVL;
  SY := SY + ECALC;
  SXY := SXY + REG.DVL * ECALC;
  SX2 := SX2 + SQR(REG.DVL);
  SY2 := SY2 + SQR(ECALC);
  ERROAUX := ((ECALC - REG.DVL)/REG.DVL);
  IF ERROAUX > ERROMA THEN
    ERROMA := ERROAUX
  ELSE
    IF ERROAUX < ERRROME THEN
      ERRROME := ERROAUX;
  ERROPARC := ERROPARC + ABS((ECALC - REG.DVL)/
    REG.DVL);
  ERROIMP := 100 * (ECALC - REG.DVL)/REG.DVL;
  WRITELN(TEXT0, REG.DVL:7:5, ' ', ECALC:7:5, ' ',
    ERROIMP:6:2, ' ', T1:6:4, ' ', T2:6:4,
```

```
      ' ',T3:6:4,' ', T4:6:4,' ', T5:6:4);  
  
END;  
  
UNTIL EOF(REGIS);  
{ Cálculo do Coeficiente de Correlação }  
AUX1 := SXY - ((SX * SY)/FILESIZE(REGIS));  
AUX2 := (SX2 - (SQR(SX)/FILESIZE(REGIS))) *  
        (SY2 - (SQR(SY)/FILESIZE(REGIS)));  
CC := AUX1 / SQRT(AUX2);  
{ Cálculo do Erro Relativo }  
EREL := (100 * ERROPARC)/FILESIZE(REGIS);  
CLOSE(REGIS);  
CLOSE(TEXT0);  
{ Impressão dos Resultados Estatísticos }  
WRITELN; WRITELN;  
WRITELN(' ':20,'Coeficiente de Correlacao = ',CC:7:5);  
WRITELN(' ':20,'Erro Relativo Medio (%) = ',EREL:9:4);  
WRITELN(' ':20,'Maior Erro (%) = ', 100*ERROMA:9:4);  
WRITELN(' ':20,'Menor Erro (%) = ', 100*ERROME:9:4);  
REPEAT UNTIL KEYPRESSED;  
  
END.
```


APÊNDICE D

OBTENÇÃO DA CORRELAÇÃO GENÉRICA

Nesta seção, como mencionado anteriormente (vide Capítulo V), será descrito o procedimento realizado para se chegar a correlação genérica.

Partindo-se dos grupos adimensionais genéricos, mostrados no Capítulo V (equação V.2 a V.9), iremos obter os respectivos grupos adimensionais particulares e conseqüentemente a correlação.

Formulando as equações para o primeiro grupo (π_1):

$$\pi_1 = L^a (a \cdot f)^b \rho^c E \quad (D.1)$$

- Colocando os termos em função das dimensões fundamentais, temos:

$$M^0 L^0 T^0 = L^a \left(\frac{L}{T}\right)^b \left(\frac{M}{L^3}\right)^c \left(\frac{L^2}{T}\right) \quad (D.2)$$

- Equacionando os expoentes, obtemos as seguintes equações para cada dimensão fundamental:

$$M \rightarrow c = 0 \quad (D.3)$$

$$L \rightarrow a + b - 3c + 2 = 0 \Rightarrow a = -1 \quad (D.4)$$

$$T \rightarrow -b - 1 = 0 \Rightarrow b = -1 \quad (D.5)$$

- Substituindo os valores encontrados para a, b e c na equação original de π_1 (equação D.1), encontramos:

$$\pi_1 = \frac{E}{(a \cdot f) L} \quad (D.6)$$

Por um processo semelhante ao desenvolvido para o grupo adimensional π_1 , encontramos os seguintes grupamentos adimensionais (π_2 a π_8), dado por:

$$\pi_2 = \frac{H}{L} \quad (D.7)$$

$$\pi_3 = \frac{D}{L} \quad (D.8)$$

$$\pi_4 = A \quad (D.9)$$

$$\pi_5 = \left(\frac{\mu}{\rho (a \text{ f}) L} \right) \quad (D.10)$$

$$\pi_6 = \frac{L g}{(a \text{ f})^2} \quad (D.11)$$

$$\pi_7 = \frac{V}{a \text{ f}} \quad (D.12)$$

$$\pi_8 = \frac{S}{L^2} \quad (D.13)$$

Assim, a correlação será escrita da seguinte forma:

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8) \quad (D.14)$$

ou seja:

$$\frac{E}{a f L} = W_1 \left[\begin{array}{l} \left(\frac{H}{L}\right)^{W_2} \left(\frac{D}{L}\right)^{W_3} (A)^{W_4} \left(\frac{\mu}{\rho a f L}\right)^{W_5} \\ \left(\frac{L g}{(a f)^2}\right)^{W_6} \left(\frac{V}{a f}\right)^{W_7} \left(\frac{S}{L^2}\right)^{W_8} \end{array} \right] \quad (D.15)$$

Dada a semelhança existente entre alguns grupos, é conveniente fazer manipulações entre os mesmos, objetivando chegar a grupos adimensionais conhecidos. As operações com grupos adimensionais não entra em contradição com a análise dimensional, pois o número de grupos permanecem inalterados, a menos que algum destes, tenha um valor fixo e possa ser englobado a constante geral.

Descrevendo as diversas manipulações realizadas em alguns grupos, temos:

- Multiplicando π_1 pelo inverso de π_2 e por π_7 , encontramos um novo grupo dado por:

$$\pi_1 = \frac{E}{V H} = \frac{1}{P} \quad (V.16)$$

- Dividindo π_2 por π_3 , encontra-se:

$$\pi_2 = \frac{H}{D} \quad (D.17)$$

- Dividindo π_3 por π_2 , tem-se:

$$\pi_3 = \frac{D}{H} \quad (\text{D.18})$$

- Dividindo π_8 por π_3 elevado ao quadrado, obtém-se:

$$\pi_8 = \frac{S}{D^2} \quad (\text{D.19})$$

- Multiplicando-se π_5 pelo inverso de π_7 , obtém-se:

$$\pi_5 = \left(\frac{\mu}{\rho V L} \right) \quad (\text{D.20})$$

Após estas manipulações, podemos observar que os novos grupamentos descritos pelas equações D.17, D.18 e D.19 são constantes e serão englobadas a constante geral W_1 , uma vez que neste trabalho não foi feita uma variação do diâmetro e da altura da coluna. Também é importante notar que os grupos dados pelas equações D.16 e D.20, representam o inverso do Número de Péclet e o inverso do Número de Reynolds respectivamente, os quais já são bastante conhecidos na literatura.

Assim, a correlação genérica obtida, adotando-se uma correlação que envolve o produto de potências dos grupamentos, é expressa da seguinte forma:

$$\frac{E}{V H} = W_1 \left[(A)^{W_2} \left(\frac{\mu}{\rho V L} \right)^{W_3} \left(\frac{L g}{(a f)^2} \right)^{W_4} \left(\frac{V}{a f} \right)^{W_5} \right] \quad (D.21)$$

O procedimento para a determinação das constantes (W1 a W5) está descrito no Capítulo V.