

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

T E S E D E M E S T R A D O

**Título: Estudo e Desenvolvimento de um
Extrator de Palhetas Rotativas**

**Autora: Elvira Cândida Cerdeira Silva
Orientador: Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi**

**Dissertação submetida à Comissão de Pós
Graduação da Faculdade de Engenharia Química da
UNICAMP como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA
QUÍMICA**

**Campinas/São Paulo
Abril/1996**

Esta versão corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida pela Eng.^a Elvira Cândida Cerdeira Silva e aprovada pela banca examinadora em 19 de abril de 1996.



Prof. Dr Elias Basile Tambourgi

Dissertação defendida e aprovada, em 19 de abril de 1996, pela banca examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi
Orientador



Prof.^a, Dr.^a. Enny Therezinha Martucci



Prof. Dr. Roger Josef Zemp

À minha mãe, Ibera

Ao meu marido, Luiz Mário

Agradecimentos

Primeiramente, ao criador por ter me concedido a graça de viver

Ao Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi pela confiança, dedicação e orientação

Ao Prof. Dr. João Alexandre F. R. Pereira pela valiosa ajuda prestada

Aos meus pais e avós pelo amor e dedicação

Ao Luiz Mário pelo amor e companheirismo.

Ao Prof. Msc. Roberto Rodrigues de Souza pela grande contribuição e amizade

Aos alunos de iniciação científica que também muito contribuíram nas experiências

À Biblioteca da UNICAMP por todo auxílio prestado.

À Mariana, Rosana e Ana Paula pelo carinho e incentivo que nunca faltaram

A todos os amigos que direta ou indiretamente contribuíram para o êxito deste trabalho

Ao CNPQ pela bolsa de estudos concedida

SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 2 - PARTE EXPERIMENTAL	06
2.1 - Introdução	07
2.2 - Descrição da Aparelhagem	07
CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DE LITERATURA	14
3.1 - O Modelo Diferencial da Dispersão Axial	29
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISES	42
4.1 - Introdução	43
4.2 - Influência da Velocidade de Rotação na Dispersão Axial	44
4.3 - Influência da Vazão de Líquido na Dispersão Axial	49
4.4 - Influência da Altura da Coluna na Dispersão Axial	55
4.5 - Influência da Área Livre da Palhetas na Dispersão Axial	63
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	71
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	75
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICES	82
Apêndice A - Calibração dos Equipamentos	84
Apêndice B - Exemplos de Curvas de Dis. de Tempos de Residência	86
Apêndice C - Programa de Computador	89
Apêndice D - Resultados Obtidos	94

NOTAÇÃO

- A - Amplitude de pulsação (cm)
 A_l - Área Livre das Palhetas (%)
 C - Concentração adimensional - equação 3.40
 C_i - Concentração (mol/ml)
 c_0 - Concentração inicial (g/ml)
 D - Coeficiente de Difusão molecular
 D_r - Diâmetro do rotor (m)
 E - Coeficiente de Dispersão Axial (cm^2/s)
 E_c^* - Coeficiente de dispersão axial (m^2/s)
 E_c - Coeficiente de dispersão axial da fase contínua (cm^2/s)
 f - frequência de pulsação (s^{-1})
 $f(g)$ - Fator de correlação geométrica - equação 3.8
 g - Aceleração da gravidade (cm^2/s)
 H - Altura de compartimento (m) - equação 3.8
 $HETS$ - Altura Equivalente de Estágios Teóricos (cm)
 h - Espaçamento entre discos rotativos (cm)
 J_i - Fluxo molar ($\text{mol}/\text{s} \cdot \text{cm}^2$)
 K - Constante definida na equação 3.3
 K_1 e K_2 - Constantes da equação 3.8
 L - Comprimento da coluna (cm)
 m_1 e m_2 - Índices da equação 3.8
 M - massa (g)
 M_i - Peso molecular (g/mol)
 n - Número total de estágios da coluna
 N - Velocidade de rotação de discos ou palhetas rotativas (s^{-1})

N_d - Número de discos rotativos

$NETS$ - Número Equivalente de Estágios Teóricos

P - Potência (watt)

Q - Vazão volumétrica de alimentação (ml/s)

r - Distância radial

R - Diâmetro dos discos (cm)

Re - Número de Reynolds

R_h - Diâmetro dos furos dos pratos (cm)

R_i^* - Taxa de reação

S - Área da seção transversal da coluna (cm²)

S_d - Área superficial dos discos (cm²)

S_h - Área de perfuração dos pratos (cm²)

t - tempo (s)

$\bar{t}$ - tempo médio de residência (s)

v - Velocidade superficial de escoamento (cm/s)

v_c - Velocidade superficial da fase contínua (cm/s)

v_d - Velocidade superficial da fase dispersa (cm/s)

$\bar{V}_c$ - Velocidade superficial verdadeira (cm/s) $\frac{v_c}{1-\phi}$ e $\frac{v_d}{\phi}$ para as fases

contínua e dispersa, respectivamente (m/s) - equação 3.8

V_0 - Velocidade Característica (cm/s)

V_T - Volume total da coluna - equação 3.40

z - Distância axial

Z - Comprimento adimensional - equação 3.40

Letras Gregas

ϕ - Fração de retenção da fase dispersa

ε - Fração de área livre de escoamento (%)

β - Número de estágios perfeitamente misturados - equação 3.5

ρ - Massa específica (g/cm^3)

ρ^* - Massa específica do fluido (Kg/m^3) - equação 3.8

μ - Viscosidade absoluta do fluido (g/cm.s)

μ^* - Viscosidade absoluta (Pa.s) - equação 3.8

ψ - Função dependente do tipo do pulso do traçador - equação 3.10

θ - Tempo adimensional - equação 3.40

θ_m - Termo definido na equação 3.46

σ^2 - Variância (curva concentração vs. θ)

σ_t^2 - Variância (curva concentração vs. t)

Subscriptos

$_i$ - Componente

$_c$ - Fase contínua

$_d$ - Fase dispersa

$_j$ - Fase

RESUMO

Nos últimos anos a extração líquido-líquido tem se tornado cada vez mais importante na Engenharia Química, e considerável atenção tem sido dispensada ao desenvolvimento de tipos cada vez mais eficientes de extratores.

Dentre os extratores mecanicamente agitados, ou os que apresentam melhor desempenho nos processos de separação, destacam-se os extratores agitados através do movimento de rotação (extratores rotativos). Estes extratores além de apresentarem bons resultados nos processos de separação, oferecem boa flexibilidade de operação e projetos, devido a serem de fácil construção.

Dos extratores rotativos o mais conhecido é o Extrator de Discos Rotativos (RDC) que através do movimento de rotação de discos proporciona a agitação e a separação de componentes de uma mistura líquida.

No presente trabalho é desenvolvido um extrator rotativo, só que ao invés de discos rotativos como o RDC, utiliza-se palhetas verticais rotativas, que podem ser perfuradas ou compactas.

O objetivo principal do trabalho é, portanto, a obtenção de dados experimentais que possam vir a contribuir para um maior conhecimento deste aparelho. O estudo baseia-se na avaliação da dispersão axial, ou mistura axial, que ocorre no equipamento, através dos dados obtidos para o Coeficiente de Dispersão Axial, dados estes, de muita importância na avaliação do desempenho de colunas de extração em geral. São analisadas as influências de parâmetros operacionais e de construção e faixas ideais de operação são propostas para a coluna.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os processos de separação dos componentes de uma solução, que dependem da distribuição de componentes entre dois líquidos miscíveis, são conhecidos como extração em fase líquida ou extração por solvente. Estes processos podem ser realizados de diversas formas. Na maioria dos casos, a solução líquida é colocada em contato com um solvente apropriado, que lhe é imiscível, e que extrai preferencialmente um ou mais componentes. Por exemplo, a acetona pode ser extraída de uma solução aquosa mediante o contato com o clorofórmio. Neste caso a acetona dissolve-se preferencialmente no clorofórmio. As separações desta espécie são de caráter essencialmente físico e os componentes quase não sofrem modificações químicas. Não obstante, a natureza química dos líquidos influencia fortemente a extensão da separação, pois a distribuição de um soluto depende da não idealidade das soluções participantes do processo. A não idealidade pode ser alterada, para influenciar de forma favorável a distribuição. É o que se faz pela mudança de temperatura, pela salinificação da solução para precipitar um soluto orgânico dissolvido em água, pelo ajuste do pH da solução ou pela alteração do estado de oxidação de um soluto metálico.

Como resultado da expansão nos processos de extração por solvente, o número e a variedade dos equipamentos de extração líquido-líquido têm sido considerável. Estes equipamentos variam desde simples vasos de mistura, usados em décadas passadas, até extratores centrífugos de alto desempenho, desenvolvidos mais recentemente.

Os vários tipos de equipamentos de contato líquido-líquido, podem ser divididos em dois grupos principais: extratores em estágios e extratores diferenciais. O primeiro grupo é identificado por uma série de estágios formados por misturadores-decantadores, onde as fases são contactadas até o equilíbrio e em seguida separadas, antes de serem enviadas aos estágios seguintes. No segundo grupo, os líquidos escoam continuamente em contracorrente, sendo a

eficiência deste grupo de extratores obtida em função do número de estágios utilizados.

No caso do primeiro grupo, normalmente se obtêm altas eficiências para cada um dos estágios e com isso um melhor “scale-up” pode ser obtido. Porém, como as fases devem ser separadas após atingir o equilíbrio, os compartimentos de decantação devem ser relativamente grandes. Isto implica que a unidade como um todo se torne volumosa, especialmente nos casos em que se dispõe de sistemas com decantação mais lenta.

Já os extratores diferenciais são mais compactos e normalmente ocupam menos espaço, quando comparados com os extratores em estágios. Nestes equipamentos, o escoamento em contracorrente é processado em função da diferença de densidades entre os fluidos. Em colunas verticais, a fase mais densa é alimentada no topo e escoar para baixo, enquanto que a menos densa é alimentada na base e escoar em direção ao topo. Os extratores diferenciais podem ser divididos em três classes principais.

- Extratores com apenas a ação da gravidade;
- Extratores mecanicamente agitados;
- Extratores agitados por pulsações.

Os extratores onde é empregada apenas a ação da gravidade, representam os tipos mais simples de colunas utilizadas na extração líquido-líquido. Além de ocuparem uma área reduzida, eles apresentam baixo custo de manutenção e de construção. Porém, as eficiências destes aparelhos são relativamente baixas, quando comparadas com as colunas agitadas. Colunas “spray”, colunas recheadas, colunas com chicanas e colunas com pratos perfurados pertencem a esta classe de extratores.

Nos extratores mecanicamente agitados, o desempenho e a eficiência são aumentados através da introdução de eixos com agitadores, adaptados ao centro de cada estágio. A característica principal destes aparelhos é a forma de agitação, sendo esta processada através do movimento rotativo de palhetas, discos, etc. O

processo de agitação possibilita um aumento na área interfacial, proporcionando assim uma maior transferência de massa entre as fases. Fazem parte deste grupo os seguintes extratores:

- Extrator “Oldshue-Huston”;
- Extrator “Sheibel”;
- Extrator de discos rotativos (RDC).

Estes equipamentos apresentam, porém, certa limitação quanto as suas operações, principalmente quando se necessita de taxas de transferência de massa mais elevadas. Pois, de acordo com a literatura, sabe-se que aumentando-se a velocidade de rotação dos agitadores para níveis mais elevados, pode acontecer um maior retorno de fluido para os estágios anteriores, e conseqüentemente à base da coluna. Este fenômeno é baseado no fato do movimento de rotação dos agitadores favorecer o deslocamento de fluido na direção radial, dos estágios destes extratores.

Os extratores agitados por pulsações, apesar de necessitarem de potências mais elevadas para suas operações, oferecem a grande vantagem de proporcionarem taxas de eficiência e transferência de massa bem mais elevadas que os demais outros extratores. Isto deve-se ao fato de que neste tipo de coluna a forma de agitação (pulsação) obedece a mesma direção de escoamento das correntes presentes, o que deve favorecer um contato mais intenso entre as fases da mistura.

A seleção de um contactor ou de um extrator para uma determinada separação é geralmente ditada por fatores econômicos. Além disso, qualquer condição especial como, complicações que surgem na presença de sólidos, formação de emulsões, etc., têm de ser levados em conta.

Oliver (1966) discutiu um critério geral para a seleção de contactores, segundo ele, as colunas com discos rotativos parecem ser uma boa alternativa para uma faixa de consumo de potência média. Esta afirmação é baseada na prática usual da indústria, pois, segundo este autor, esses equipamentos

apresentam boas relações eficiência/capacidade, excelente flexibilidade de operação, boa flexibilidade de operação e características de projetos confiáveis.

Como apresentado no presente capítulo até aqui, os extratores mecanicamente agitados normalmente oferecem bons resultados quanto a eficiência de separação de misturas ou de “scale up”. A forma dessa agitação entretanto é que depende do tipo de separação que se deseja obter, o custo disponível, etc.

No presente trabalho é desenvolvido um extrator mecanicamente agitado por palhetas rotativas. O equipamento consta basicamente de uma coluna cilíndrica contendo palhetas rotativas (perfuradas ou compactas) no seu interior a fim de se obterem melhores níveis de agitação e de mistura.

O estudo é baseado na avaliação dos níveis de mistura obtidos através dos valores encontrados para o Coeficiente de Dispersão Axial, observando-se diversas combinações de variáveis operacionais e de geometria no equipamento. São utilizadas variações no comprimento da coluna, na área livre das palhetas, na velocidade de rotação das palhetas e na vazão contínua de fluido. Com isso, são analisadas as influências de cada parâmetro individualmente e indicadas as melhores faixas de operação para o equipamento.

CAPÍTULO 2

PARTE EXPERIMENTAL

2.1 - INTRODUÇÃO

No presente capítulo são descritos todos os detalhes referentes à montagem experimental do extrator utilizado. Conforme já descrito anteriormente, aqui é realizado o estudo da dispersão axial, utilizando-se, para isso, os dados do Coeficiente de Dispersão Axial para cada experimento realizado. Os experimentos constaram de testes traçador tipo pulso para cada combinação de parâmetros geométricos e operacionais escolhidos. O objetivo do experimentos foi a coleta de dados de concentração ao longo da coluna em função do tempo e da altura. Com isso, foram obtidas as Curvas de Distribuição de Tempos Residência (D.T.R.), necessárias à determinação do Coeficiente de Dispersão Axial.

A seguir, primeiramente, será apresentada uma descrição geral do extrator, com todos os detalhes de construção para, em seguida, ser detalhado o procedimento experimental utilizado, e as faixas de operação que foram testadas.

2.2 - DESCRIÇÃO DA APARELHAGEM

O extrator de palhetas rotativas construído para este estudo, mostrado na Figura 2.1, consiste de um tubo de vidro com 85 cm de altura e 5,6 de diâmetro, dividido em cinco compartimentos, através de pratos perfurados de PVC que serviam também como distribuidores de fluxo. Estes pratos são fixos à coluna através das juntas de fixação dos estágios (flanges) e possuem, cada um deles, 18 furos de 0,5cm de diâmetro.

Em cada compartimento foram instalados pontos para tomadas de amostras, enquanto que as seções do fundo e do topo foram dotadas de terminais reservados às alimentações e retiradas das correntes líquidas, respectivamente.

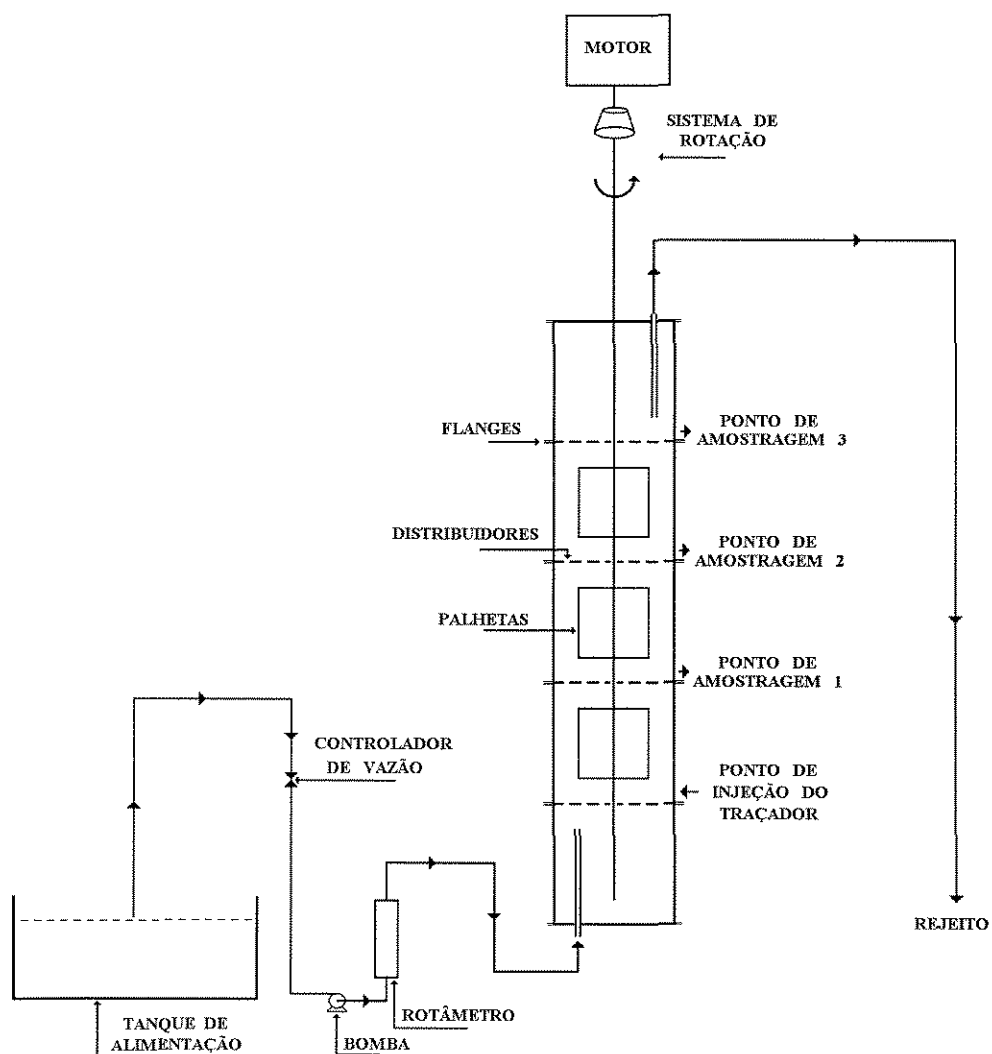


Figura 2.1 - Montagem Experimental

No interior da coluna foi instalado o mecanismo de agitação. Este constou de um arranjo de palhetas rotativas, construídas também de PVC, fixadas a uma haste cilíndrica do mesmo material que, por sua vez, era conectada a um motor de velocidade variável. Cada compartimento possuía duas palhetas conectadas à haste central, dispostas conforme mostrado na figura 2.2.

As palhetas têm uma área livre variável. Foram utilizadas palhetas compactas (0% de área livre) e palhetas com 8 furos de 0,5 cm de diâmetro (14% de área livre). A Figura 2.2 mostra o detalhe de um conjunto de duas palhetas perfuradas, sendo que em cada estágio da coluna foi utilizado um conjunto de 2 palhetas rotativas.

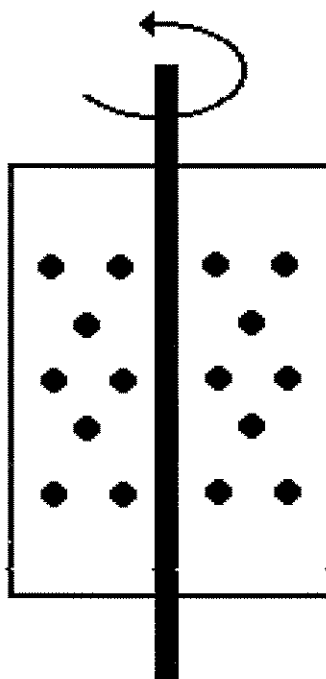


Figura 2.2 - Detalhe de um conjunto de duas palhetas rotativas com 14 % de área livre (palheta perfurada)

A figura 2.3 mostra o detalhe de um conjunto de 2 palhetas rotativas só que neste caso estas são compactas e não perfuradas como na figura 2.2.

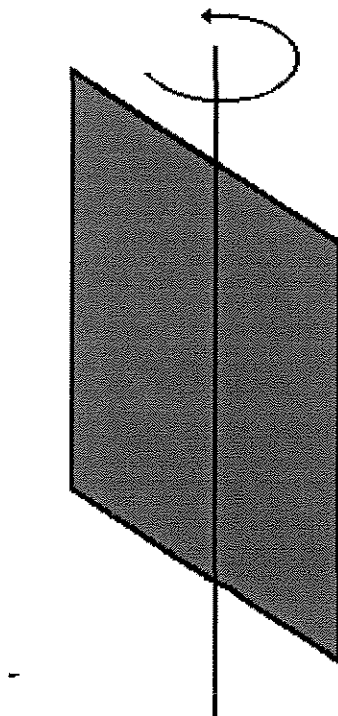


figura 2.3

A velocidade de rotação das palhetas foi medida com o auxílio de um tacômetro digital em contato com a haste rotativa, e controlada através de um regulador de tensão, “dimmer”. Esta medida de velocidade de rotação era feita da seguinte forma: adaptou-se um “marcador de giros” que nada mais é de que um cilindro de PVC, totalmente escuro, à haste rotativa com a finalidade de ampliar o diâmetro da haste e com isso facilitar a leitura dos giros obtidos. Neste marcador foram adaptadas células brancas que quando visualizadas pelo tacômetro eram automaticamente percebidas e contadas pelo aparelho. Desta forma a medida que as células iam sendo visualizadas, o tacômetro, por sua vez, ia fornecendo as

leituras convenientes das velocidades de rotação da haste. A figura 2.4 mostra o detalhe destas leituras.

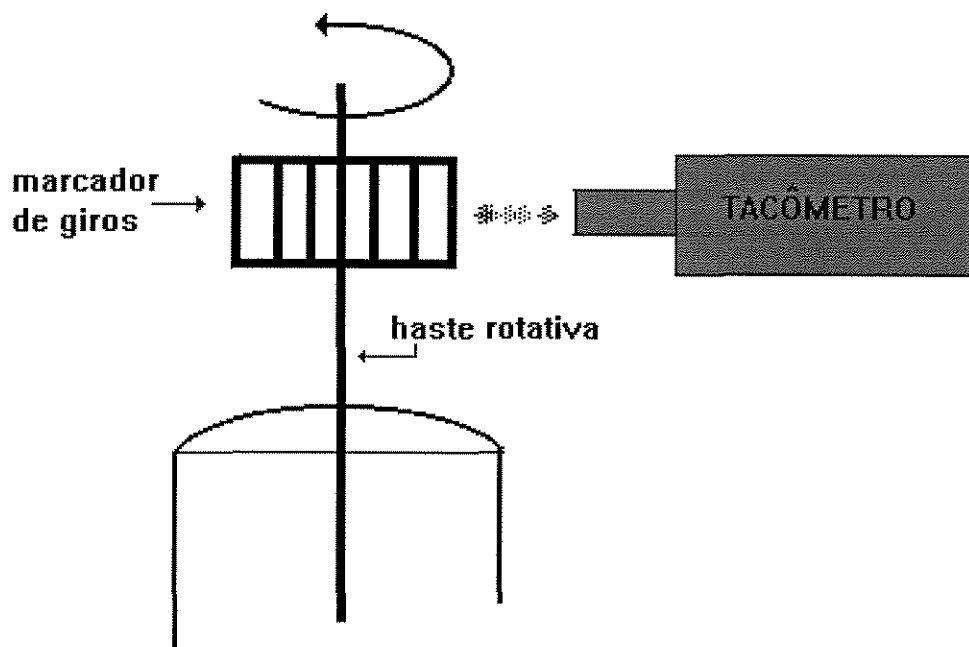


Figura 2.4 - Detalhe da leitura da velocidade de rotação da haste

O procedimento experimental adotado para a avaliação da dispersão axial é conhecido como teste traçador tipo pulso. Este teste envolve a obtenção de dados experimentais de concentração necessários para a construção das curvas de distribuição de tempos de residência (D.T.R.). A técnica consiste na injeção de pulsos de um determinado corante, com concentração conhecida, na base da coluna, e coletas periódicas de amostras ao longo do equipamento.

Neste estudo adotou-se a operação em uma única fase, utilizando-se a água como fase contínua, escoando no sentido ascendente, com vazão controlada por rotâmetro, cujos dados de calibração encontram-se listados no Apêndice A-2. O

corante utilizado foi o alaranjado de metila, devido às suas características serem apropriadas a este tipo de experimento.

Na Tabela 2.1 são listadas todas as combinações de variáveis utilizadas nos experimentos.

Tabela 2.1 - Resumo das variáveis e suas faixas estudadas para dispersão axial

Variável estudada	Situações estudadas
Altura da Coluna (cm)	17,0; 34,00; 51,00
Área livre das palhetas (%)	0,0; 14,0
Velocidade de Rotação (r.p.s.)	0,0; 1,00; 2,00; 3,00; 4,00; 5,00
Vazão (ml/s)	3,02; 5,37; 7,73; 10,09; 12,45

As combinações de parâmetros, geométricos e operacionais, obedeceram a seguinte metodologia. Para cada parâmetro operacional adotado percorria-se toda a faixa de parâmetros geométricos. Por exemplo, para uma velocidade de rotação de 0,0 r.p.m. testava-se todas as vazões de escoamento, num total de 5 vazões, e todas as áreas livres de palhetas, resultando assim em um total de 10 corridas, somente para a velocidade de rotação de 0,0 r.p.m..

Assim, escolhida a geometria de coluna conveniente e ajustados os parâmetros operacionais (velocidade de rotação e a vazão), fazia-se a injeção de pulsos de 5,0 ml de traçador, com concentração conhecida ($c_0 = 0,005 \text{ g/ml}$) na base da coluna. Em seguida, as amostras eram coletadas instantaneamente nos três estágios da coluna observando-se intervalos de tempo, contados a partir do tempo em que era injetado o pulso, que variavam de acordo com as combinações de parâmetros adotadas em cada experiência realizada. Para testes com

velocidades de rotação mais reduzidas (0 a 60 r.p.m.), estes demoravam em média 30 minutos. Os intervalos de tempo adotados eram de 30s nos primeiros 5 minutos e nos demais este intervalo ia aumentando gradativamente até que não fosse identificado mais nenhum traço de corante no interior da coluna. Utilizou-se, também, nas corridas com baixas velocidades de rotação, intervalos de 30, 60 e 120 segundos. Nas experiências com velocidades de rotação mais elevadas existia uma maior periodicidade de tempo de retirada de amostras que eram em média de 30 segundos, pois em algumas delas o tempo total de experimento era de apenas 5 minutos.

As amostras obtidas eram posteriormente enviadas a um espectrofotômetro de marca PROCION SC-90, previamente calibrado, onde eram analisados os valores das suas transmitâncias. Com o auxílio das curvas de calibração, obtidas do aparelho (Apêndice A-1), os dados de transmitância eram convertidos à dados de concentração. De posse das concentrações das várias amostras coletadas nas experiências, eram construídas as curvas de distribuição de tempos de residência, C_i / c_o “versus” $t/\bar{t}$, utilizando-se o programa de computador DISPERSA, cuja descrição detalhada encontra-se no Apêndice C.

O modelo da determinação do coeficiente de dispersão utilizado, modelo diferencial da dispersão, será descrito com detalhes na seção 3.1 deste trabalho enquanto que no Apêndice D estão listados todos os resultados experimentais obtidos.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DE LITERATURA

Antes de iniciar a revisão bibliográfica ou a análise dos trabalhos existentes na literatura que foram utilizados no presente estudo, vale a pena ressaltar que não foi encontrada nenhuma publicação referente ao modelo de coluna aqui apresentado. Nos estudos analisados os tipos de colunas que mais se assemelharam à coluna com palhetas rotativas foram as de discos rotativos (RDC) e a coluna Sheibel, sendo que para o tipo de palheta aqui empregada, o modelo com discos rotativos apresentou uma maior aproximação.

Assim, devido à carência de informações da literatura referentes às colunas com palhetas rotativas, no presente capítulo, apresentaremos uma abordagem geral sobre o fenômeno da dispersão axial em colunas de extração. Nesta abordagem estarão envolvidos os conceitos fundamentais da dispersão axial (modelos, métodos de estudo, etc.) e uma análise de trabalhos encontrados na literatura sobre dispersão axial em outros tipos de colunas mecanicamente agitadas. Além disso, será também apresentado, no presente capítulo, uma descrição detalhada do Modelo Diferencial da Dispersão Axial, já que foi este o modelo teórico empregado aos dados experimentais para a obtenção do Coeficiente de Dispersão Axial.

Devido à maior semelhança do extrator de discos rotativos com o de palhetas rotativas aqui estudada, far-se-á uma análise mais genérica sobre as RDC's, dando-se ênfase principalmente aos trabalhos que mostram estudos de avaliações de desempenho deste tipo de equipamento.

Como primeiro trabalho escolhido para ser avaliado nesta análise, pode-se citar o publicado por Reman (1951). Neste trabalho o autor apresentou, pela primeira vez, o extrator de discos rotativos como sendo uma coluna de extração formada por vários compartimentos, separados entre si por pequenos anéis circulares ("chicanas"), e agitada através de discos rotativos, introduzidos no interior de cada compartimento. A figura 3.1 mostra um desenho esquemático do extrator de discos rotativos apresentado por Reman (1951).

e que a eficiência de separação pode ser obtida através da relação entre a carga total introduzida e a Altura Equivalente dos Estátios Teóricos (“HETS”), Reman(1951) mediu a eficiência em sua RDC, observando variações de alguns parâmetros geométricos e de operação, tais como: o diâmetro de abertura dos anéis, o espaçamento entre os discos e a vazão total de líquido introduzida. Porém, observa-se neste trabalho que nenhum estudo foi realizado com relação à dispersão axial.

Vermijs e Kramers (1954) estudaram a eficiência de separação em uma coluna de discos rotativos com comprimento superior a estudada por Reman (1951), observando variações na velocidade de rotação e na carga líquida introduzida. Mas, neste trabalho, não foi analisadas influências de parâmetros de geometria e nem as faixas de inundação.

O trabalho publicado por Logsdail et al (1957) faz referências à influência das variáveis geométricas na taxa de inundação de um RDC. Neste trabalho os autores, através de considerações apresentadas por Gayler et al (1953), introduziram o conceito da velocidade característica, que é utilizado até hoje na literatura.

Logsdail et al (1957) obtiveram uma expressão que relaciona a velocidade característica, V_0 , fração de retenção da fase dispersa, ϕ , e as vazões das fases, dispersa, v_d , e contínua, v_c , sendo ela a seguinte:

$$\frac{v_d}{\phi} + \frac{v_c}{1-\phi} = V_0 \frac{(1-\phi)}{\phi^{1/3}} \quad (3.2)$$

A velocidade característica é um parâmetro que pode ser determinado em escoamentos bifásicos em colunas de extração e representa a velocidade de ascensão ou de sedimentação das gotas de uma fase na outra. [Heyberger et al (1983)]. Além da velocidade característica Logsdail et al (1957) realizaram estudos de retenção da fase dispersa em uma RDC, observando os pontos de inundação.

Kung e Beckman (1961) modificaram a equação proposta por Logsdail (1961), equação 3.2, incluindo uma constante K na velocidade superficial da fase contínua. A correlação apresentada por estes autores foi portanto a seguinte:

$$\frac{v_d}{\phi} + \frac{K v_c}{1-\phi} = V_0 \frac{(1-\phi)}{\phi^{1/3}} \quad (3.3)$$

onde os valores de K variavam entre 1,0 e 2,1.

Strand et al (1962) verificaram que para uma análise mais segura do desempenho de um RDC eram necessários estudos relacionados com tamanho médio de gota, fração de retenção (“holdup”) da fase dispersa e do coeficiente de dispersão axial. Segundo Strand et al (1962), quando duas fases miscíveis estão presentes em contra-corrente em um contactor, o tamanho médio de gota e a quantidade de gotas, formadas na zona de contacto, são governadas principalmente pela velocidade de rotação introduzida no aparelho. À baixas velocidades, obtêm-se gotas grandes que surgem rapidamente na zona de contato e conduzem a pequena área interfacial e baixas taxas de transferência de massa. À altas velocidades de rotação, são produzidas gotas pequenas e aproximadamente esféricas, que levam a um aumento na área interfacial e consequentemente altas taxas de transferência de massa. Para o cálculo do diâmetro médio de gota, os autores utilizaram os conceitos propostos por Hinze (1955) e observaram que estes conceitos só podem ser utilizados para os casos em que não acontece transferência de massa ou multidivisão de gotas.

No estudo apresentado por Strand et al (1962) foi mostrada também a importância da avaliação da mistura ou da dispersão axial no cálculo de eficiências e taxas de transferência de massa para extratores em geral. Neste trabalho os autores apresentam um método para a determinação do Coeficiente de Dispersão Axial, através de testes traçador tipo pulso. Ou seja, injeção de pulsos de traçador (corante) na base da coluna e coleta de amostras no topo. Os autores

utilizaram-se também de um método capaz de predizer curvas de distribuição de tempos de residência em função das variáveis geométricas e operacionais. Assim, com a determinação do grau de mistura ou do Coeficiente de Dispersão Axial, tornava-se possível uma melhor compreensão dos mecanismos que regem a operação de uma coluna de discos rotativos.

Westerterp e Ladisman (1962) interpretaram dados de Curvas de Distribuição de Tempos de Residência (D.T.R.), obtidas na saída de uma coluna de discos rotativos, como sendo uma combinação de um modelo tipo pistão com alguma difusão axial. Assim, mediante testes de traçador do tipo “degrau” estes autores conseguiram chegar a uma expressão em que o coeficiente de dispersão axial era obtido em função da vazão de líquido e da velocidade de rotação dos discos. A equação obtida por estes autores foi portanto a seguinte:

$$\frac{v L}{E} = \frac{2 n}{1 + 13 \times 10^{-3} \left(\frac{R N}{v} \right)} \quad (3.4)$$

Apesar desta equação fornecer valores do coeficiente de dispersão axial para colunas com discos rotativos com razoável precisão, os autores não testaram variações na geometria da coluna, de grande importância para o projeto do equipamento. Estes autores demonstraram que a dispersão axial era composta de contribuições devido à vazão de líquido circulante e devido à agitação e recirculação.

Aerov et al (1963) descreveram uma forma de obtenção da dispersão axial em uma coluna de discos rotativos, relacionando-a como coeficiente de difusão turbulenta. A determinação deste coeficiente foi feita através da alimentação contínua de um traçador na fase contínua (teste tipo degrau). Amostras foram tomadas em determinados pontos ao longo da coluna. A partir dos dados

experimentais e utilizando métodos de adimensionalização estes autores apresentaram a seguinte correlação para o coeficiente de dispersão axial:

$$\frac{E_j}{Af\epsilon_j L} = \frac{\frac{v}{Af\epsilon_j}}{2\beta + \frac{L}{n}} \quad (3.5)$$

Já Oliver (1966) fez um estudo mais genérico com respeito às colunas de extração e discutiu um critério geral para a seleção de extratores. Segundo ele, as colunas com discos rotativos são uma boa alternativa para uma faixa de consumo de potência média. Esta afirmação foi baseada na prática usual da indústria, pois as colunas com discos rotativos apresentam boas relações eficiência/capacidade, excelente flexibilidade de operação e características de projetos confiáveis.

Como trabalhos mais recentes encontrados na literatura, envolvendo a dispersão axial em extratores de discos rotativos, destacam-se os publicados por Góis (1987), por Tambourgi (1989) e o publicado por Kumar e Hartland (1992). Nos dois primeiros trabalhos estes autores utilizaram colunas de discos rotativos sem a presença de anéis circulares (“chicanas”), logo de bem mais simples construção que as RDC’s tradicionais, e obtiveram resultados plenamente satisfatórios quando comparados com os dos outros autores. Já o apresentado por Kumar e Hartland trata-se de um trabalho teórico envolvendo dados experimentais de dispersão axial, obtidos por diversos autores utilizando colunas com discos rotativos.

No trabalho publicado por Góis (1987) são apresentados 2 estudos distintos na avaliação do desempenho da coluna, a dispersão axial e o consumo de energia, utilizando o sistema monofásico. Para a dispersão axial este autor utilizou testes traçador tipo pulso e determinou valores do coeficiente de dispersão axial, empregando o modelo diferencial da dispersão proposto por Levenspiel (1962) para a obtenção das curvas de distribuição de tempos de residência encontradas com os valores experimentais de concentração no topo do

equipamento. Enquanto que para o consumo de energia a análise foi feita em função dos dados da potência consumida pelos discos, através das medidas da corrente e voltagem fornecidas ao motor do agitador.

Com os dados de coeficiente de dispersão axial e da potência consumida pelos discos, Góis (1987) analisou as influências de vários parâmetros tanto, na dispersão quanto no consumo de energia, e apresentou a seguinte correlação de modelagem:

$$\frac{E}{v h} = \left[\frac{\mu}{R^2 N \rho} \right]^{0,2704} \left[\frac{N^3 R^5 \rho}{P g} \right]^{0,0127} \left[\frac{R N}{v} \right]^{0,231} \left[\frac{L N_d}{R} \right]^{0,637} \quad (3.6)$$

Já Tambourgi (1989) foi mais além e, com uma coluna semelhante à utilizada por Góis (1987), realizou estudos relacionados com o escoamento bifásico, empregando o sistema n-butanol/água. Tambourgi (1989) determinou também os coeficientes de dispersão axial nos experimentos, só que desta vez, para as duas fases, contínua e dispersa, através de testes traçador tipo pulso. Além da dispersão Tambourgi (1989) mediu os pontos de inundação da coluna e determinou valores para a velocidade característica em cada experimento. Esta técnica consistiu do ajuste das vazões de alimentação até que o ponto de inundação viesse a ser visualizado. Através das vazões de inundação o autor obteve valores para a velocidade característica e, em seguida, para a fração de retenção na condição de inundação, seguindo o modelo descrito por Logsdail et al (1957).

Com estes estudos Tambourgi (1989) analisou também as influências de vários parâmetros tanto na dispersão quanto na inundação e apresentou a seguinte correlação de modelagem para a velocidade característica:

(3.7)

$$\frac{V_0}{LN} = 0,151 \times 10 \left[\frac{\mu_c}{R^2 N \rho_c} \right]^{0,856} [\varepsilon]^{-0,018} \left[\frac{N_d}{N_d + 1} \right]^{-1,319} \left[\frac{h}{R} \right]^{-2,63} \left[\frac{g}{N^2 R} \right]^{0,142}$$

Kumar e Hartland (1992) estudaram a dispersão axial em colunas de discos rotativos, utilizando dados experimentais referentes a 32 sistemas líquidos, obtidos por 19 autores. Neste trabalho foram utilizados dados experimentais tanto do sistema monofásico como do bifásico e comparadas as diversas correlações empíricas obtidas. Com isso, Kumar e Hartland (1992) propuseram uma correlação genérica para o cálculo do coeficiente de dispersão axial da fase contínua em RDC's. A correlação encontrada neste trabalho foi portanto a seguinte:

$$\frac{E_c^*}{V_c H} = K_1 + K_2 \left[\frac{N D_r}{V_c} \right]^{m_1} \left[\frac{N D_r \rho_c^*}{\mu_c^*} \right]^{m_2} f(g) \quad (3.8)$$

Os valores das constantes k_1 , k_2 , m_1 e m_2 , da equação acima foram obtidos pelos autores em função das várias correlações analisadas. Um resumo de todas as correlações além dos vários valores das constantes encontram-se publicadas no seu trabalho. Kumar e Hartland (1992) concluíram também que correlações para dispersão axial em fase dispersa são bem mais difíceis de serem obtidas que para a fase contínua, devido aos resultados serem bastante contraditórios.

Existem ainda outros trabalhos que podem ser de grande utilidade na presente análise de literatura, relacionados à dispersão axial em colunas de extração mecanicamente agitadas, só que desta vez, em colunas pulsadas e não em RDC's, como vinha sendo apresentado até o momento. Dentre alguns outros destacam-se como os principais os seguintes: Kagan et al (1965), Kim e Baird (1976), Tojo et al (1976), Kumar e Hartland (1989) e Souza (1994). A seguir será apresentado um resumo do que foi mostrado nestes trabalhos

Kagan et al (1965) apresentaram estudos que permitiram a caracterização do coeficiente de dispersão axial em uma coluna com fluxo pulsado. Neste trabalho os autores observaram os efeitos da carga líquida introduzida na coluna, e a intensidade da agitação, que neste caso era na forma de pulsação, e apresentaram a seguinte correlação para a dispersão, utilizando o sistema querosene-água:

$$E = 1,2 \times 10^5 \left[\frac{A^{1,2} f^{1,35}}{(v_c + v_d)^{1,4}} \right] \quad (3.9)$$

Tojo et al (1976), também, apresentaram uma correlação para a determinação do coeficiente de dispersão axial em uma coluna pulsada. Os valores encontrados por estes autores foram definidos através das curvas de distribuição de tempos de residência, obtidas de testes traçador tipo pulso. A correlação proposta por estes autores segue o modelo proposto por Miyauchi e Vermeulen (1963), sendo portanto, a seguinte:

$$\frac{E_c}{v_c \cdot h} = 0,258 + \frac{1}{2} \left[-\frac{\psi}{\pi} + \frac{2A(1-\phi)}{v_c} \operatorname{sen} \psi \frac{S_h}{S} \right] \frac{S_d}{S} \quad (3.10)$$

onde

$$\psi = \cos^{-1} \left[\frac{v_c}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot f (1-\phi)} \right] \quad (3.11)$$

Kim e Baird (1976) mediram o coeficiente de dispersão axial em uma coluna com pratos pulsantes, utilizando a técnica da reação química ácido-base instantânea. Este processo, segundo os autores, consiste na injeção de pulsos de uma base (NaOH, por exemplo) em um determinado ponto da coluna, sendo uma

das correntes formada por uma solução ácida. Os pulsos foram introduzidos a uma altura média de coluna de modo que a variação da coloração do indicador pudesse ser percebida. Os dados de tempo e de comprimento obtidos foram introduzidos no Modelo Diferencial da Dispersão, proposto por Levenspiel (1962), e os valores dos coeficientes de dispersão axial determinados para diversas combinações de variáveis.

Hafez et al (1979) estudaram a influência do diâmetro da coluna na dispersão axial, em uma coluna com pratos pulsantes, utilizando duas técnicas de medida do coeficiente de dispersão axial. A primeira delas, também utilizada por Kim e Baird (1976), foi a técnica da reação química ácido-base instantânea. Mas foi constatado, nesse trabalho, que em colunas com baixas intensidades de agitação a observação visual da reação ácido-base era muito deficiente. Segundo os autores, isto deve-se ao fato da forte ocorrência de correntes de circulação no interior do aparelho. Na segunda técnica, foram injetados pulsos de um sal, com as respostas sendo medidas através de uma célula de condutividade. Este método, segundo Hafez et al (1979), é o mais adequado para colunas com diâmetros maiores e reduzidas intensidades de agitação.

Mais recentemente, Prvcic et al (1989) estudaram a dispersão axial em uma coluna com fluxo pulsado, utilizando perfis de concentração ao longo do comprimento da coluna, através de testes traçador tipo “degrau”. Com os dados de concentração obtidos, destes testes, os autores apresentaram a seguinte correlação empírica:

$$\frac{E_c}{v \cdot h} = \frac{v_c \left[h - 0,764 \left(2 \frac{A}{\pi} \right) \right]}{0,271 \cdot Re^{0,875} \left(\frac{\mu_c}{\rho_c} \right) + \frac{0,067 (2 \cdot A \cdot f \cdot R_h)}{\varepsilon^{1,7}}} \quad (3.12)$$

O estudo proposto pelos autores apresenta vantagens sobre os anteriores, já que na equação proposta nesse trabalho, não são necessários dados de fração de retenção para sua utilização. Todavia, deve-se salientar que os testes traçador realizados, foram testes tipo “degrau”, que apresenta como principal desvantagem o elevado consumo de traçador.

Como trabalho mais recente relacionado a extração em colunas pulsadas, encontrado na presente análise de literatura, destaca-se o estudo publicado por Baird et al (1992) e por Souza (1994), em que a intensidade da dispersão axial é avaliada em uma coluna com pratos pulsantes. Foram utilizados, nestes dois trabalhos, testes traçador tipo pulso e determinados os valores do coeficiente de dispersão axial através do Modelo Diferencial da Dispersão proposto por Levenspiel (1962). Com estes valores foram analisadas as influências de vários parâmetros na dispersão axial, para algumas variações introduzidas na geometria da coluna.

O estudo apresentado por Baird et al (1992) é de grande importância para a pesquisa aqui apresentada, já que nele são mostrados bons resultados referentes ao tipo de experimento realizado para dispersão axial (testes tipo pulso) e o modelo da dispersão utilizado (Modelo Diferencial da Dispersão).

Souza (1994) também estudou os efeitos da dispersão axial em uma coluna de pratos pulsantes. Só que a coluna estudada por Souza (1994) difere da apresentada por Baird et al (1992) devido ao arranjo de pratos pulsantes utilizado. O primeiro utilizou o arranjo convencional de pratos pulsantes (pratos todos alinhados) enquanto que Baird (1992) utilizou um arranjo onde os pratos se alternavam com relação a posição de fixação na haste.

Souza (1994), como os vários outros autores, além de analisar as influências de vários parâmetros na dispersão axial, apresentou também uma correlação de modelagem para a determinação do coeficiente de dispersão axial para a coluna de pratos pulsantes estudada. A correlação encontrada pelo autor foi:

$$\frac{E}{v.h} = 1,0045 \left(\frac{\mu}{\rho.v.L} \right)^{0,00394} \left(\frac{L.g}{(A.f)^2} \right)^{-0,40016} \left(\frac{v}{A.f} \right)^{0,41191} \quad (3.13)$$

Pode-se citar ainda um outro trabalho bastante interessante sobre dispersão axial, só que desta vez, utilizando uma coluna “Kuhni”, portanto diferente dos tipos de colunas até então mencionadas. Esse trabalho, apresentado por Kumar et al (1988), propõe correlações para o cálculo do coeficiente de dispersão axial nas fases contínua e dispersa e, em função destes valores, propõe uma forma de determinação de valores de concentração na saída da coluna. O detalhe interessante é o fato das concentrações serem calculadas na saída da coluna através dos valores do Coeficiente de Dispersão Axial.

Foi constatado também neste trabalho que o coeficiente de dispersão da fase dispersa é bem mais complexo de ser obtido, devido a influências da velocidade de escoamento das fases e do diâmetro médio de gota. Além disso, os autores concluíram que em algumas regiões de operação (proximidades da inundação e nas baixas velocidades de rotação), os valores dos coeficientes obtidos pela relação sugerida, não são mais válidos, devido principalmente a não adequação às condições impostas pelo modelo.

Diante da análise dos estudos aqui descritos, faz-se necessário a apresentação de algumas conclusões encontradas com respeito à dispersão axial nas colunas de extração aqui analisadas.

Primeiramente, pode-se constatar que na maioria dos trabalhos analisados, os estudos relacionados com mistura axial constam normalmente da determinação de valores para o coeficiente de dispersão axial, análises de influências de parâmetros (geométricos e operacionais), e apresentação de correlações de modelagem para a determinação deste coeficiente, ou do Número de Dispersão, $E/v.L$.

Os principais modelos utilizados pelos vários autores para a determinação do coeficiente de dispersão axial foram: o Modelo Diferencial da Dispersão, descrito por Levenspiel (1962) e o Modelo em Estágios ou de Fluxo Reverso, descrito por Sleicher (1959). O modelo Diferencial se baseia em respostas obtidas através de curvas de distribuição de tempos de residência (D.T.R.), enquanto que o Modelo de Fluxo Reverso, em balanços de massa nos vários estágios da colunas, considerando-se constante a fração de regresso (“backmixing”) de cada uma das fases.

Existem ainda outros modelos para a avaliação da dispersão axial em colunas pulsadas. O proposto por Novotny et al (1970), baseado nas concentrações de traçador nas regiões de adjacências dos pratos e o proposto por Prvcic et al (1989) que adota a técnica da reação ácido-base. Porém, nos últimos anos, percebe-se que existe uma tendência para a utilização do Modelo Diferencial que, segundo estudos recentes desenvolvidos nesta área, este modelo, além de ser bem mais simples, apresenta resultados idênticos aos obtidos pelos demais métodos.

Assim, no presente trabalho é apresentado um estudo sobre a dispersão axial em uma coluna com palhetas rotativas. Este estudo segue a mesma metodologia utilizada nas pesquisas com os outros tipos de colunas, como as RDC's e as colunas pulsadas. Ou seja, primeiramente são determinados valores para o Coeficiente de Dispersão Axial, através de testes traçador tipo pulso, utilizando-se o Modelo Diferencial da Dispersão. Em seguida, são analisadas as influências de cada parâmetro separadamente na dispersão axial. Uma descrição detalhada do Modelo Diferencial da Dispersão encontra na seção seguinte (seção 3.1).

Quanto a comparação dos resultados obtidos no presente trabalho com outros existentes na literatura, isto não foi possível de ser realizado devido a quase inexistência de estudos desta natureza para este tipo de coluna. Em trabalhos posteriores poderá se vir a comparar os resultados aqui apresentados

com os obtidos com os encontrados em outros tipos de estratores mecanicamente agitados.

3.1 - O MODELO DIFERENCIAL DA DISPERSÃO AXIAL

A dispersão axial é um fenômeno que ocorre normalmente em equipamentos de contato contínuo e descreve a intensidade com que um produto contido em uma determinada corrente, se dispersa na direção longitudinal no interior de um equipamento ou de um vaso de mistura. O coeficiente de dispersão axial é, portanto, o parâmetro que mede a intensidade com que ocorre a mistura, sendo determinado a partir de alguns modelos já estabelecidos na literatura, cujas particularidades individuais devem ser adequadas aos equipamentos e experimentos a serem realizados.

Basicamente, a literatura apresenta dois modelos que descrevem a dispersão axial em equipamentos de mistura. No primeiro deles, o modelo diferencial, a coluna é considerada como um equipamento compacto, em que as medidas de concentração de soluto variam com relação ao tempo e à altura da coluna. Os valores dos coeficientes de dispersão axial são encontrados através de curvas de distribuição de tempos de residência, determinadas utilizando-se medidas de concentração de traçador obtidas no topo do equipamento. No segundo modelo, o modelo em estágios, ou modelo de escoamento reverso, considera-se a coluna como uma série de estágios perfeitamente misturados, sendo os valores do coeficiente de dispersão axial determinados a partir de balanços de massa nos vários compartimentos do equipamento.

O Modelo Diferencial da Dispersão é o modelo mais utilizado para descrever o comportamento de dispersão axial que ocorre em colunas de extração. Este modelo caracteriza o transporte de massa na direção axial, em termos de um coeficiente de dispersão axial, E . Segundo o autor este modelo considera a concentração de reagente constante em toda a seção transversal da coluna e a intensidade da dispersão independente da posição no equipamento. Logo não é prevista a existência de zonas de estagnação neste modelo. A intensidade da dispersão axial pode então variar desde o modelo de escoamento

empistonado ($E=0$), até o modelo de um reator tanque idealmente misturado ($E=\infty$).

O Modelo diferencial da Dispersão, portanto, analisa o desvio com relação ao modelo empistonado. No modelo empistonado não existe nenhuma mistura ao longo do equipamento. O bloco de traçador percorre toda a coluna sem misturar-se, saindo com o mesmo valor de concentração na entrada (concentração inicial). Porém, o que se deseja conhecer é o quanto acontece de desvio do modelo. Este desvio é o que se denomina de dispersão, significando a intensidade de mistura ao longo do equipamento.

Já o modelo de dispersão em estágios ou de escoamento reverso proposto por Sleicher (1959), prevê a coluna como sendo uma cascata de compartimentos perfeitamente misturados, onde o Coeficiente de Dispersão Axial é determinado em função de um sistema de equações formado por correlações de balanços de massa e de equilíbrio entre as fases, em cada um dos estágios da coluna.

Conforme descrito anteriormente, o modelo utilizado neste trabalho, para a determinação do coeficiente de dispersão axial, foi o Modelo Diferencial da Dispersão, descrito por Levenspiel (1962). Antes de analisar o modelo proposto pelo autor faz-se necessário um estudo analítico do balanço de massa em um elemento diferencial de uma coluna com altura, dz , e área de seção transversal constante, conforme mostrado na figura 3.2.

Como para o balanço de massa tem-se a seguinte relação

(3.14)

$$\left[\begin{array}{l} \text{Taxa líquida que sai} \\ \text{do elemento diferencial} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Taxa líquida de acumulo} \\ \text{no elemento diferencial} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Taxa líquida gerada} \\ \text{no elemento diferencial} \end{array} \right] = 0$$

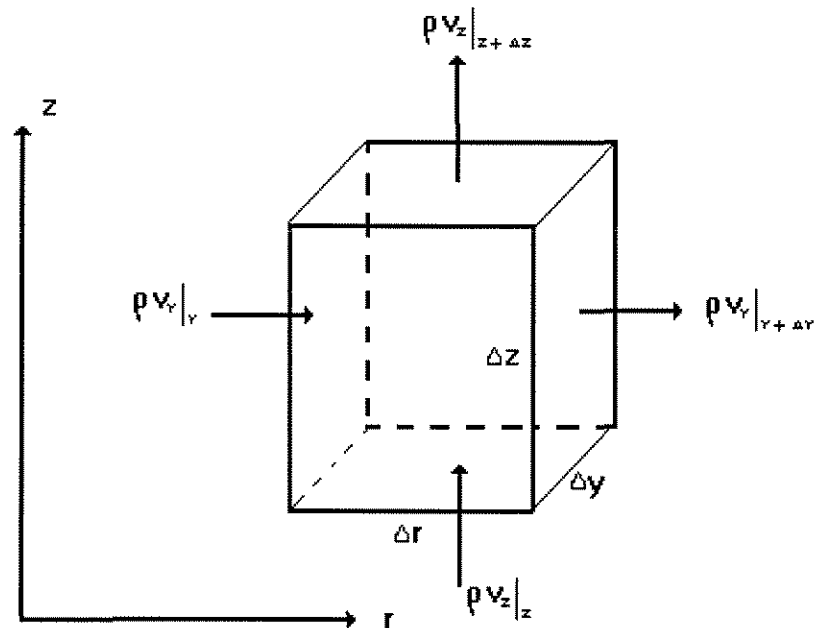


Figura 3.2 - Desenho esquemático do escoamento de um fluido através de um de volume de controle diferencial.

Especificando-se cada termo do balanço de massa (equação 3.14) para o caso de um volume de controle de um tubo cilíndrico tem-se que:

1 - Taxa de acúmulo de i

$$(2\pi r \Delta r \Delta z) \frac{\partial \rho_i}{\partial t} \quad (3.15)$$

2 - Taxa de massa de i que entra em z

$$(2\pi r \Delta r) \rho_i v_{i(z)} \Big|_z \quad (3.16)$$

3 - Taxa de massa de i que sai em $z + \Delta z$

$$(2\pi r \Delta r) \rho_i v_{i(z)} \Big|_{z+\Delta z} \quad (3.17)$$

4 - Taxa de massa de i que entra em r

$$(2\pi r \Delta z) \rho_i v_{i(r)} \Big|_r \quad (3.18)$$

5 - Taxa de massa de i que sai de $r + \Delta r$

$$(2\pi r \Delta z) \rho_i v_{i(r)} \Big|_{r+\Delta r} \quad (3.19)$$

6 - Taxa de produção ou consumo de i por reação química

$$(2\pi r \Delta r \Delta z) R_i^* \quad (3.20)$$

Substituindo os termos (3.15 a 3.20) na equação 3.14 e dividindo-se toda a equação pelo volume do elemento diferencial, $(2\pi r \Delta r \Delta z)$, tem-se que:

$$\rho_i v_{i(r)} \Big|_{r+\Delta r} - \rho_i v_{i(r)} \Big|_r + \rho_i v_{i(z)} \Big|_{z+\Delta z} - \rho_i v_{i(z)} \Big|_z + \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = R_i^* \quad (3.21)$$

ou seja;

$$\frac{r \rho_i v_i(r)|_{r+\Delta r} - r \rho_i v_i(r)|_r}{\Delta r} + \frac{r \rho_i v_i(z)|_{z+\Delta z} - r \rho_i v_i(z)|_z}{\Delta z} + r \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = r R_i^* \quad (3.22)$$

em Δz e $\Delta r \rightarrow 0$

$$r \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} r \rho_i v_{iz} - \frac{\partial (r \rho_i v_{ir})}{\partial r} + R_i^* r \quad (3.23)$$

dividindo toda a equação 3.23 por r temos que:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = - \frac{\partial \rho_i v_{iz}}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho_i v_{ir})}{\partial r} + R_i^* \quad (3.24)$$

Sabendo-se que:

$$C_i = \frac{\rho_i}{M_i} = \text{concentração molar} \quad (3.25)$$

e

$$M_i = \frac{M}{\text{mol}} = \text{peso molecular} \quad (3.26)$$

$$\rho_i = C_i M_i \quad (3.27)$$

Dividindo 3.24 por M_i

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} (C_i v_{iz}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r C_i v_{ir}) + R_i^* \quad (3.28)$$

Sabendo-se também que:

$$J_i = C_i (v_i - v) \quad (3.29)$$

que é o fluxo molar relativo a velocidade média $\underline{v}$. Desta forma,

$$C_i v_i = J_i - C_i v \quad (3.30)$$

Substituindo em 3.28 obtém-se que

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} (J_i - C_i v) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r (J_i - C_i v)] + R_i^* \quad (3.31)$$

como

$$J_i = - D_i \nabla C_i ; \quad J_{iz} = - D_{iz} \frac{\partial C_i}{\partial z} \quad \text{e} \quad J_{ir} = - D_{ir} \frac{\partial C_i}{\partial r} \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \frac{\partial J_i}{\partial z} - \frac{\partial C_i v}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial r} J_i + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r C_i v_r + R_i^* \quad (3.33)$$

Considerando $v_r = 0$ e $v_z = \text{constante}$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(- D_{iz} \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) - v_z \frac{\partial C_i}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial r} J_i + R_i^* \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(- D_{iz} \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) - v_z \frac{\partial C_i}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(- r D_{ir} \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) + R_i^* \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{iz} \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - v_z \frac{\partial C_i}{\partial z} + \frac{1}{r} D_{ir} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) + R_i^* \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{iz} \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - v_z \frac{\partial C_i}{\partial z} + \frac{1}{r} D_{ir} \left[r \frac{\partial^2 C_i}{\partial r^2} + \frac{\partial C_i}{\partial r} \right] + R_i^* \quad (3.37)$$

ou seja

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{iz} \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - v_z \frac{\partial C_i}{\partial z} + D_{ir} \left[\frac{\partial^2 C_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_i}{\partial r} \right] + R_i^* \quad (3.38)$$

Assumindo as seguintes hipóteses:

- Não existência de reação química
- Não existência de variação de concentração na direção radial
(ausência de gradiente na direção angular)
- Não existência de formação de caminhos preferenciais

A equação 3.38 ficará da seguinte forma:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{iz} \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - v_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \quad (3.39)$$

Adimensionalizando-se as variáveis e considerando $C_i = C'$

$$C = \frac{C'}{C_0} ; \quad Z = \frac{z'}{L} ; \quad \theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad \text{e} \quad \bar{t} = \frac{V_T}{Q} \quad (3.40)$$

Aplicando em 3.39 tem-se que

$$\frac{\partial(C C_0)}{\partial\left(\frac{L}{v} \theta\right)} = D_{iz} \frac{\partial^2(C_0 C)}{\partial(ZL)^2} - v_z \frac{\partial(C C_0)}{\partial(ZL)} \quad (3.41)$$

Considerando-se C_0 e L constantes

$$\frac{v}{L} \frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{D}{L^2} \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{v}{L} \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (3.42)$$

Dividindo por v/L

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{D}{vL} \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (3.43)$$

Segundo o autor desde que o processo de mistura envolve uma redistribuição de material por agitação e uma vez que isso se reflete em um número considerável de vezes durante o escoamento, esta redistribuição pode ser considerada como sendo de natureza estatística e análoga à difusão molecular. Os autores descrevem então a dispersão axial de forma semelhante à forma em que é descrita a difusão molecular na direção axial, z , considerando-se o termo convectivo, já que o fluido se encontra em movimento. Desta forma,

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{E}{vL} \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (3.44)$$

sendo E , o coeficiente de dispersão axial, o parâmetro que mede a intensidade da dispersão axial, durante o escoamento.

Na equação 3.44, o grupo adimensional, E/vL , ou inverso do Número de Peclet é, segundo Levenspiel (1962), conhecido como o Número de Dispersão e serve para medir a extensão da dispersão axial que ocorre em equipamentos de mistura. Nos casos de equipamentos contínuos e com vários compartimentos

(colunas de pratos, por exemplo), este grupo também pode ser utilizado em função da altura dos estágios, ou seja, $E/v.h$.

Segundo o autor para dispersão de pequena intensidade ($E/v.L$ pequeno) com pulso inicial ideal (injeção instantânea de traçador), $E/v.L$ pode ser encontrado através do perfil de concentração obtido pela resolução da equação 3.44. Resumindo, resolvendo-se a equação 3.44, considerando-se todas as condições que foram impostas chega-se ao seguinte perfil de concentração:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2\sqrt{\pi\left(\frac{E}{V.L}\right)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\left(\frac{E}{V.L}\right)}\right] \quad (3.45)$$

Da equação acima, desde que sejam relacionados C/C_0 “versus” θ , uma família de curvas (curvas de distribuição de tempos de residência), podem vir a ser geradas com diferentes valores atribuídos para o grupo $E/v.L$. O autor considera como gaussianas as curvas geradas pela equação acima e determina os valores do grupo $E/v.L$. O autor ressalva que estes valores podem também ser obtidos através da determinação das médias e das variâncias das curvas.

Para o caso de dispersão de grande intensidade e pulso de entrada não ideal, segundo o mesmo autor, a curva de distribuição de tempos de residência, C/C_0 “versus” θ , modifica significativamente a sua forma. A curva não é simétrica, apresentando um prolongamento em forma de cauda, devido a existência de uma fração de traçador que tende a escoar em sentido contrário ao escoamento do fluido contínuo. Nesta situação, as condições de escoamento nos pontos de injeção de traçador e de retiradas de amostras, influem no formato da curva. Surgem dois casos importantes que estão relacionados com as condições de contorno a serem utilizadas na equação 3.44. O sistema fechado, caracterizado por mudanças no tipo de escoamento nas fronteiras, e o sistema aberto

caracterizado por não haver perturbações nas fronteiras. Nas figuras 3.3.a e 3.3.b, são esquematizados estes dois tipos de sistemas

Nos sistemas abertos (Figura 3.3.a), segundo o autor, existem dois métodos de medida da concentração de traçador. O método conhecido como “método através da parede”, onde o registro da concentração de traçador é feito a medida que ele passa pelo ponto de amostragem e o “método de copo de mistura”, onde a medida é feita em diversos pontos da coluna.

No caso do sistema fechado (Figura 3.3.b), o equipamento é considerado como um recipiente fechado de comprimento L , em que a injeção de traçador é feita na entrada e as retiradas das amostras na saída. A dispersão é considerada constante no interior do recipiente e nula nos pontos de entrada e saída.

Para os sistemas fechados com dispersões de grande intensidade e injeção de pulso inicial não ideal, segundo o autor, não foi possível obter-se expressões analíticas que expressasse os comportamentos das curvas de Distribuição de Tempos de Residência obtidas no topo da coluna. Entretanto médias e variâncias podem ser determinadas para estas curvas. Com estes parâmetros torna-se possível então calcular o Coeficiente de Dispersão Axial.

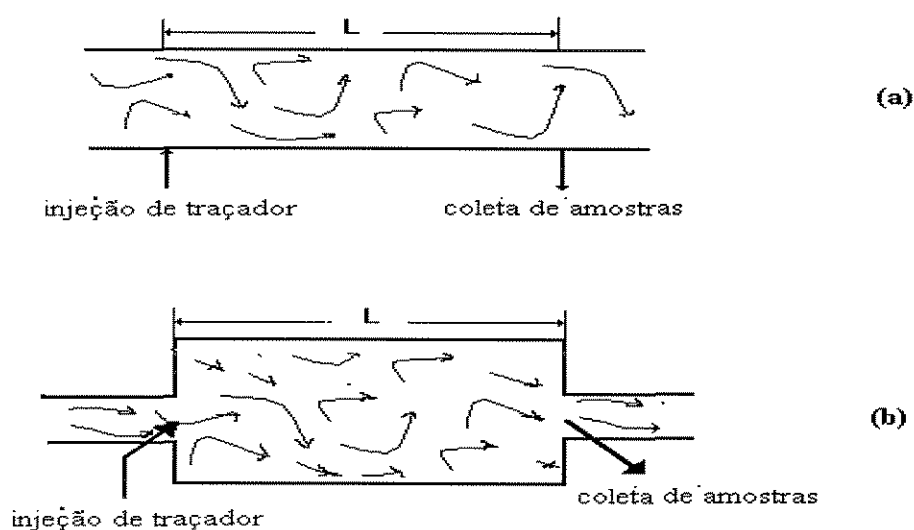


Figura 3.3 -Modelos de sistemas utilizados para o cálculo de dispersões de grande intensidade

Na figura 3.4 são mostrados vários tipos de curvas que podem ser obtidas na coluna. As curvas podem variar desde curvas simétricas (dispersões de pequena intensidade e pulso instantâneo) até curvas com dispersão de grande intensidade (curvas com prolongamentos em forma de caudas).

Observa-se da figura 3.4 que para pequenos valores do Número de Dispersão, o escoamento tende ao modelo empistonado, enquanto que para valores mais elevados deste grupo, o escoamento tende para o modelo de mistura perfeita.

Segundo o autor, os valores do grupo $E/\nu.L$ para dispersões de grande intensidade em sistemas fechados, podem ser encontrados através dos cálculos das médias, θ_m , e das variâncias, σ^2 , das distribuições dos pontos das curvas. Estes parâmetros podem ser determinados, segundo o autor, através das seguintes correlações:

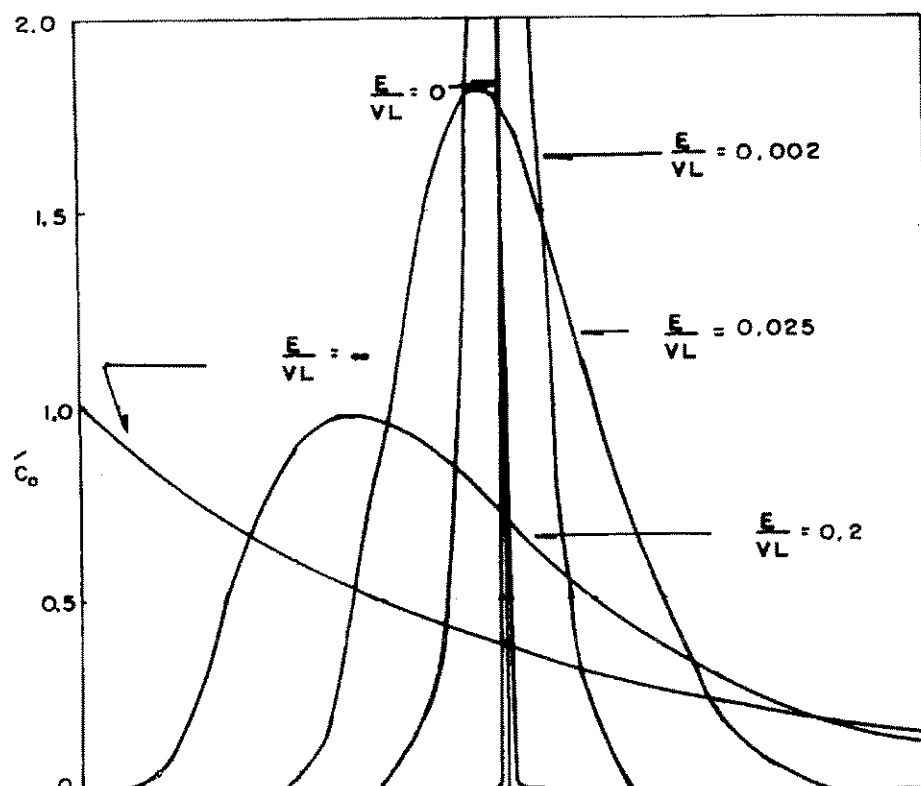


Figura 3.4 - Exemplos de Curvas de Distribuição de Tempos de Residência (D.T.R.) para vários valores do Número de Dispersão Axial

$$\theta_m = \bar{t} \quad (3.46)$$

e

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} = 2 \left(\frac{E}{V.L} \right) - 2 \left(\frac{E}{V.L} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{VL}{E}} \right) \quad (3.47)$$

O tempo médio de residência, $\bar{t}$, pode ser obtido através da definição do 1º momento (média ou centróide) da distribuição, dada pelas seguinte equação:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t.C.dt}{\int_0^{\infty} C.dt} \quad (3.48)$$

Para um número discreto de pontos, a equação 3.48 pode ser representada da seguinte forma:

$$\bar{t} = \frac{\sum t_j.C_j.\Delta t}{\sum C_j.\Delta t_j} \quad (3.49)$$

A variância, σ_t^2 , ou o 2º momento da distribuição, é o parâmetro que representa a dispersão da distribuição dos pontos, e neste caso pode ser definida da seguinte forma:

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2.C.dt}{\int_0^{\infty} C.dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2.C.dt}{\int_0^{\infty} C.dt} - \bar{t}^2 \quad (3.50)$$

Da mesma forma que para o tempo médio de residência, para o caso de um número discreto de pontos, a variância pode ser determinada da seguinte forma:

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum (t - \bar{t})^2 C_j \cdot \Delta t_j}{\sum C_j \cdot \Delta t_j} = \frac{\sum t_j^2 \cdot C_j \cdot \Delta t_j}{\sum C_j \cdot \Delta t_j} - \bar{t}^2 \quad (3.51)$$

Desde que se disponha dos dados de σ_t^2 e $\bar{t}$, obtidos via equações 3.51 e 3.49, respectivamente, na equação 3.47, pode-se determinar os valores para o grupo $E/v.L$. A resolução desta equação deve ser feita numericamente, utilizando-se um método adequado. Na aproximação inicial deve-se desprezar o segundo termo da equação, ficando o Número de Dispersão igual a metade da variância. A correção do valor do Número de Dispersão, pode ser feita utilizando-se a correlação 3.47, na sua forma original.

Assim, no presente trabalho, a determinação do coeficiente de dispersão axial foi realizada utilizando-se as equações desenvolvidas para o Modelo Diferencial da Dispersão, levando-se em conta a dispersão em grande intensidade em sistemas fechados. Estas considerações foram baseadas nas Curvas de Distribuição de Tempos de Residência obtidas dos experimentos (curvas com prolongamentos em forma de caudas) e na ocorrência de mudanças de escoamento somente na fronteira delimitada pelos pontos de injeção e de amostragem (base e topo, respectivamente), da coluna. Para isso foi desenvolvido o programa DISPERSA, listado no Apêndice C, com a finalidade de determinar-se o Número de Dispersão e conseqüentemente, o coeficiente de dispersão axial para cada experimento realizado. Exemplo de Curvas de Distribuição de Tempos de Residência obtidas experimentalmente são mostrados no Apêndice B.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 - INTRODUÇÃO

Conforme descrito nas seções anteriores, os experimentos realizados no presente trabalho constaram de testes traçador tipo pulso para a obtenção de curvas de distribuição de tempos de residência como respostas a estes testes. Os valores do coeficiente de dispersão axial foram determinados através da aplicação do Modelo Diferencial da Dispersão a estas curvas.

Na presente seção são interpretados os resultados obtidos dos experimentos realizados. Esta interpretação é baseada nos dados apresentados em tabelas e gráficos, onde são relacionados o Coeficiente de Dispersão Axial e os demais parâmetros em estudo. Desta forma, é analisada a influência da velocidade de rotação, da vazão de líquido, da altura da coluna e da área livre das palhetas, com relação à dispersão axial.

A análise foi baseada na observação do comportamento apresentado pelos gráficos e tabelas com posteriores justificativas dos fenômenos ocorridos. Para a análise da influência da velocidade de rotação das palhetas e da vazão de líquido utilizaram-se os gráficos E “versus” N e E “versus” Q , respectivamente, enquanto que nos casos da análise da influência da altura da coluna (17, 34 e 51 cm), e da área livre das palhetas utilizaram-se as tabelas de dados, devido às geometrias utilizadas nestes experimentos não serem suficientes para permitir um tratamento mais individualizado, ou seja com gráficos E “versus” L e E “versus” A_L .

4.2 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO NA DISPERSÃO AXIAL

Antes de iniciar a análise dos gráficos, propriamente dita, vale a pena salientar que a intensidade da agitação externa introduzida na coluna está relacionada com a velocidade de rotação devido ao movimento radial de fluido nos estágios, formando assim verdadeiros vórtices de líquido em cada compartimento (figura 4.1). Estes vórtices, em geral, fazem com que aconteça um maior contato do traçador com a fase contínua líquida presente, conduzindo assim a uma maior mistura na coluna. Porém, nos casos de velocidades de rotação excessiva pode haver tanto o deslocamento muito rápido de traçador para o topo da coluna, como o regresso para a base. Nestes dois casos pode ocorrer menores índices de mistura mesmo com velocidades de rotação elevadas devido ao menor contato do traçador com a corrente líquida. Uma outra observação importante que deve ser mostrada, no que diz respeito a agitação, trata-se da combinação da velocidade de rotação e a vazão de líquido, já que neste tipo de coluna ambos parâmetros provocam a movimentação da massa líquida. Desta forma, na presente análise também é mostrada, nos gráficos, a influência da vazão de líquido, apesar de que uma avaliação mais detalhada da influência deste parâmetro na dispersão axial ser descrita na seção seguinte.

A avaliação da influência da velocidade de rotação na dispersão axial foi baseada no comportamento mostrado nos gráficos das figuras 4.2 e 4.3. Neles são relacionados o Coeficiente de Dispersão Axial, E , com a velocidade de rotação, N , mostrando também a influência da vazão de líquido, Q . A faixa de velocidade de rotação analisada neste estudo variou de 0,0 a 5,0 r.p.s (rotações por segundo).

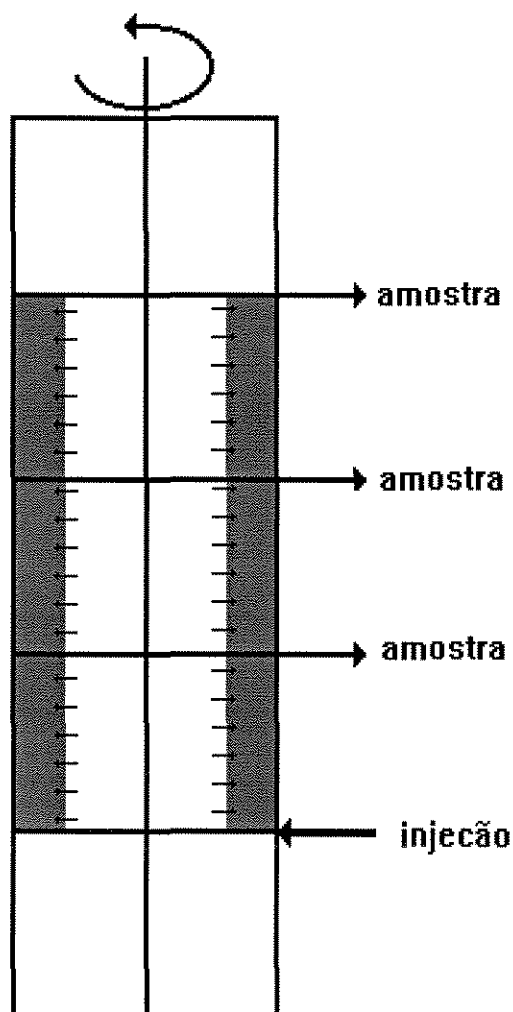


Figura 4.1 - Detalhe do vórtex formado nos estágios da coluna

As figuras 4.2 e 4.3 mostram os gráficos do Coeficiente de Dispersão “versus” velocidade de rotação. Nestas figuras a vazão de líquido também aparece como uma variável, já que são apresentadas curvas independentes para cada vazão de líquido, permanecendo constantes a área livre das palhetas e a altura da coluna para figura.

Analisando-se primeiramente os gráficos mostrados na figura 4.2, observa-se claramente uma tendência de crescimento dos valores do Coeficiente de

Dispersão Axial com a velocidade de rotação, o que é perfeitamente justificável em função do aumento da agitação do fluidos provocado pelo movimento das palhetas. A maior agitação deve aumentar o contato entre o traçador e a fase líquida o que leva a uma maior mistura e maior dispersão axial na coluna.

Verifica-se também analisando-se a figura 4.2 uma tendência de queda nos níveis de dispersão para valores da velocidade de rotação em torno de 2,0 r.p.s.. Esta tendência é acentuada somente nos casos de vazões mais elevadas (10 ml/s). Estes casos, conforme já descrito no início desta seção, tem como justificativa o rápido deslocamento de traçador para o topo da coluna, sem que aconteça um maior contato com a fase líquida presente. O escoamento empistonado tende a ser formado e índices de dispersão menores são obtidos.

Observa-se aqui então a influência não só de um parâmetro (velocidade de rotação), mas de um conjunto de parâmetros (velocidade de rotação, vazão e área livre de palhetas) na dispersão.

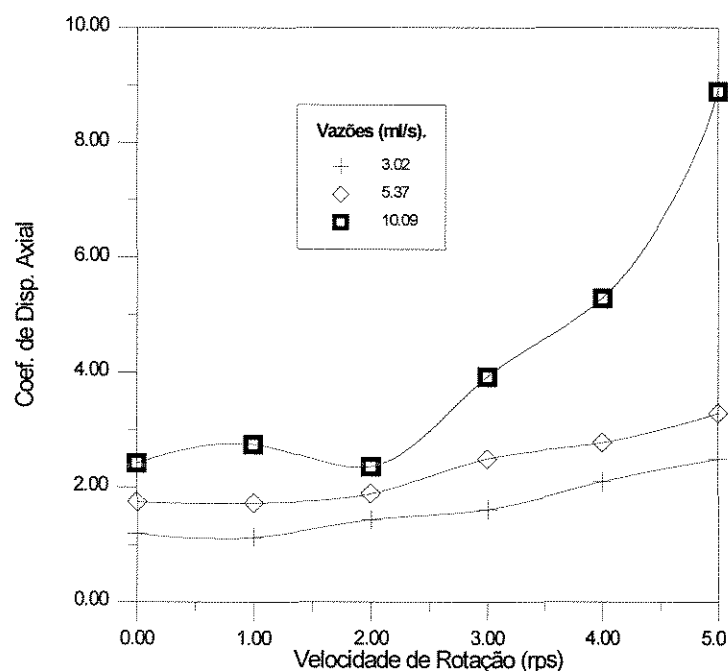


Figura 4.2 - Gráfico Coef. Dispersão “versus” Vel. Rotação
Palhetas Compactas - Altura 51 cm

Os dados mostrados na figura 4.3 têm como diferença básica dos mostrados na figura 4.2 a área livre das palhetas ter aumentado de 0% para 14%. Esta figura tem como detalhe principal a ocorrência de “quedas” ou decrescimentos nos níveis de mistura para velocidades de rotação em torno de 1,0 r.p.s. e 5,0 r.p.s.. As “quedas” mostradas nesta figura são bem mais nítidas que na figura 4.2, para a vazão de 10,0 ml/s, e vêm confirmar as evidências que tinham sido comentadas anteriormente, apesar de que agora o decrescimento ter ocorrido a velocidade de 1,0 r.p.s. e não à 2,0 r.p.s. Do que se conclui que com vazões mais elevadas a dispersão tende a diminuir quando a velocidade de rotação é mais baixa. Ou seja, o efeito da vazão tendendo a conduzir o corante, ou o traçador para o topo da coluna, se sobrepõe ao efeito da velocidade de rotação em dispersá-lo nos estágios.

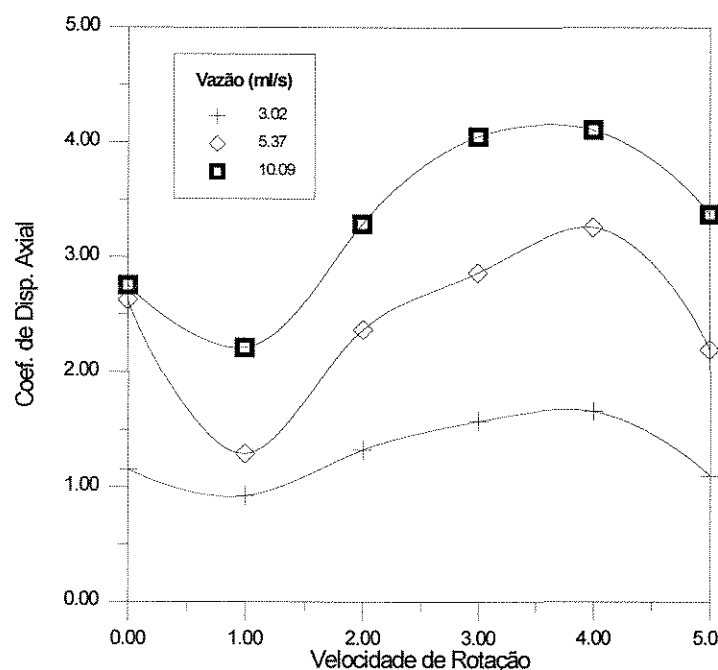


Figura 4.3 - Gráfico Coef. Dispersão “versus” Veloc. Rotação
Palhetas Perfuradas - Altura 51

Desta forma, fica clara a existência de faixas ou regiões de operação ótimas para a coluna, em função de combinações de alguns parâmetros, geométricos ou de operação. No nosso caso especificamente as regiões ótimas são apresentadas em função das combinações formadas tanto pela velocidade de rotação e vazão de líquido; como pelo comprimento da coluna e área livre das palhetas.

Portanto, quanto a influência da velocidade de rotação das palhetas na dispersão axial, o que se concluiu é que este parâmetro geralmente influencia positivamente nos índices de mistura. Porém, deve-se salientar a existência de faixas de operação, provenientes das combinações com outros parâmetros (vazão, por exemplo), que podem levar tanto a níveis bem mais superiores aos que seriam obtidos somente com o aumento da velocidade de rotação, como a níveis inferiores de dispersão.

4.2 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE LÍQUIDO NA DISPERSÃO AXIAL

A vazão de operação ou de escoamento da fase contínua é também uma variável bastante importante no estudo do comportamento de mistura ou na dispersão axial.

Nos equipamentos agitados de contato contínuo em geral, o processo de mistura é resultante principalmente do efeito da agitação imposta ao fluido. Esta agitação é obtida tanto através de agentes externos (agitadores, etc.) como da própria movimentação do fluido em escoamento. A agitação decorrente do escoamento do fluido está associada diretamente à vazão de alimentação da coluna, através da velocidade superficial de escoamento.

No presente trabalho, a análise da influência da vazão de operação na dispersão axial é mostrada através dos comportamentos apresentados nos gráficos das figuras 4.4 a 4.7. Estas figuras mostram gráficos E “versus” Q , para valores individuais de velocidade de rotação. São analisadas também as variações associadas às mudanças na geometria de área livre das palhetas e no comprimento de coluna. Assim, primeiramente são mostrados os gráficos obtidos para alturas de coluna de 51cm (3 estágios) e, em seguida os gráficos para as colunas com 1 estágio somente (17cm).

Analisando-se os comportamentos mostrados nas figuras observa-se, primeiramente, nos gráficos das figuras 4.4 e 4.6 uma tendência geral de crescimento contínuo da dispersão com a vazão, enquanto que nos das figuras 4.5 e 4.7 um crescimento, porém com uma tendência de formação de “picos de dispersão” à vazões e velocidades rotação mais elevadas.

Primeiramente, analisando-se os comportamentos das figuras 4.4 e 4.6, justifica-se o crescimento contínuo da dispersão com a vazão apresentado em função do aumento da turbulência causada tanto pelo aumento da vazão como da velocidade superficial do escoamento o que deve proporcionar melhores índices de

mistura. Na figura 4.6 há de se registrar também uma tendência de inversão do comportamento da curva de velocidade de 5,0 r.p.s. com relação as demais. Esta tendência pode perfeitamente ter sido causada pelo efeito da fração de retorno que pode ocorrer sempre quando acontece uma agitação excessiva. O efeito da fração de retorno, ou fator de “backmixing” é definido de várias maneiras por diversos autores, sendo que a definição mais geral encontrada na literatura, é a de que este fator representa uma fração de traçador que regressa para os estágios anteriores ou para a base da coluna ou do vaso de mistura.

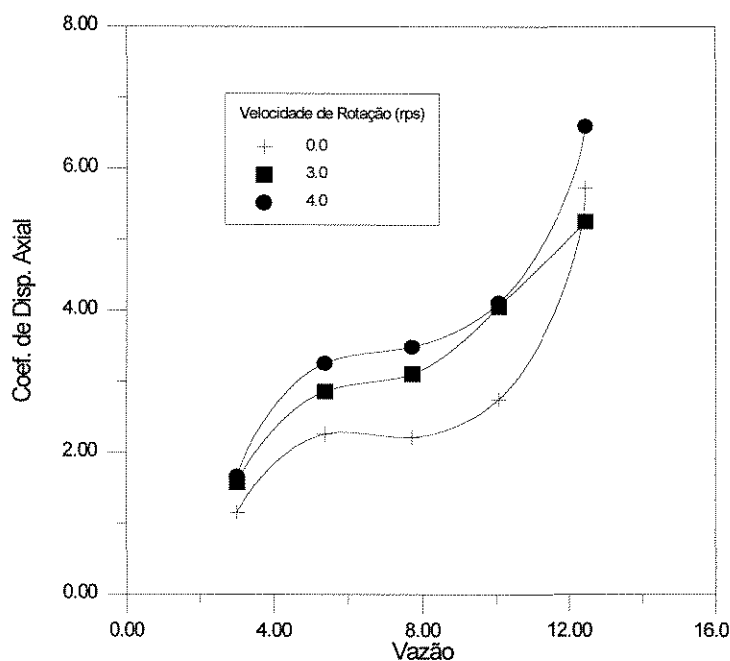


Figura 4.4 - Gráfico. Coef. Dispersão “versus” Vazão de Líquido
Palhetas Perfuradas - Comprimento 51cm

Analisando-se as figura 4.5 e 4.7, observa-se como detalhe interessante a formação dos “picos de dispersão” para vazões de líquido em torno de 10 ml/s. Estes “picos” são encontrados em todas as curvas e torna-se cada vez mais acentuados à medida que a velocidade de rotação é aumentada. A formação desses

“picos” deve, sem dúvida, estar associado ao crescimento e posteriormente, queda nos níveis de mistura devido ao transporte de traçador no interior da coluna. Com relação ao crescimento, isto já foi detalhado no início da seção, ou seja, a velocidade superficial de escoamento é também um fator de agitação que deve aumentar o contato entre o traçador e o líquido na coluna. Agora, com relação a “queda” acontecida nos níveis de dispersão, que é verificada aproximadamente à vazões entre 10 e 13 ml/s, é justificado em função do transporte muito rápido de traçador da base ao topo da coluna. Ou seja, vazões e velocidades de rotação mais elevadas podem conduzir o traçador mais rapidamente ao topo da coluna, reduzindo assim o tempo de residência deste traçador no interior do equipamento e, conseqüentemente, os níveis de dispersão ou de mistura. Este fato vem justamente confirmar as evidências que tinham sido percebidas (apesar de em pequena intensidade) na análise da figura 4.3, quando tratada a influência da velocidade de rotação na dispersão axial.

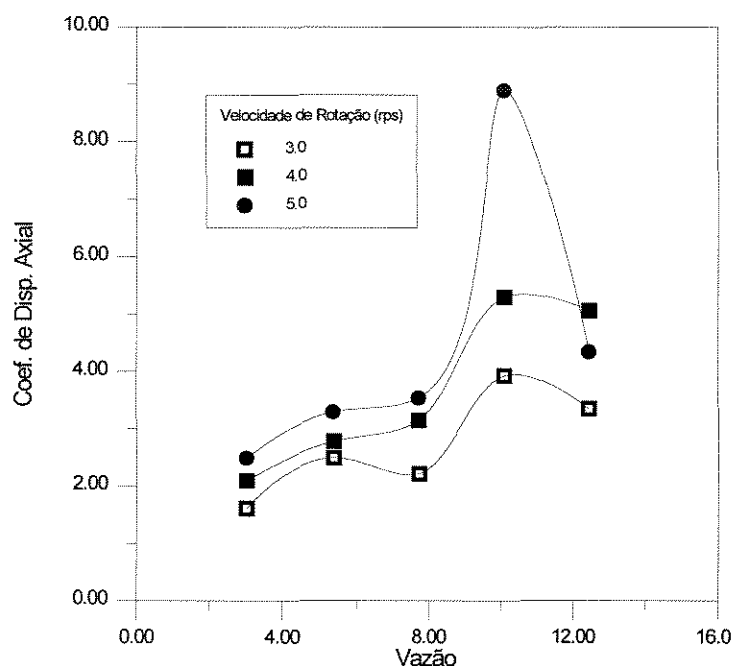


Figura 4.5 - Gráfico. Coef. Dispersão “versus” Vazão de Líquido
Palhetas Compactas - Comprimento 51cm.

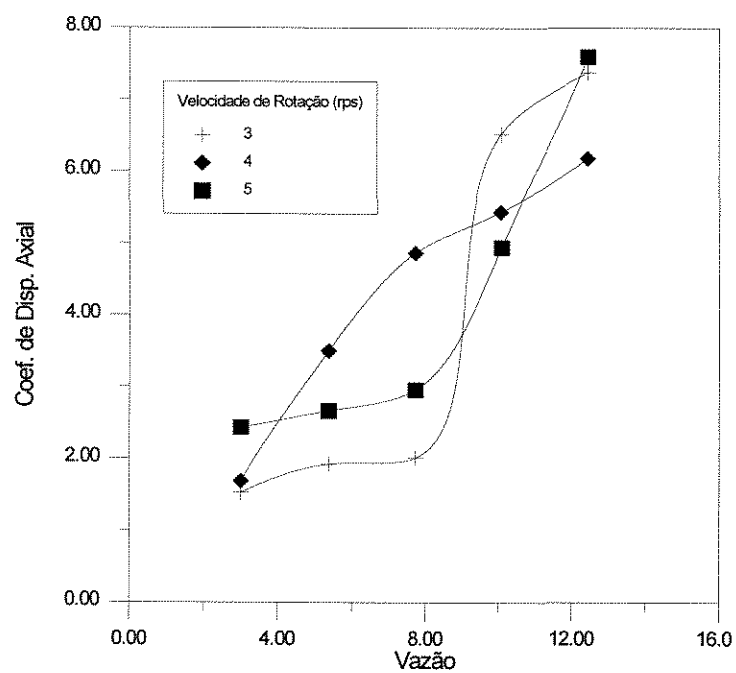


Figura 4.6 - Gráfico.Coeff. Dispersão “versus” Vazão de Líquido
Palhetas Compactas - Comprimento 17 cm

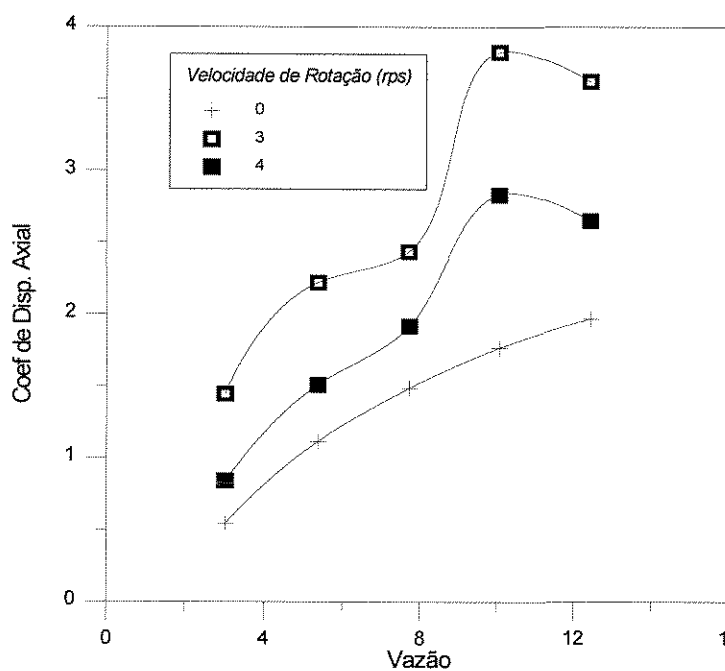


Figura 4.7 - Gráfico.Coeff. Dispersão “versus” Vazão de Líquido
Palhetas Perfuradas - Comprimento 17 cm

Uma outra análise destas figuras pode ser feita observando-se os comportamentos dos gráficos das figuras 4.4 e 4.5 com os da 4.6 e 4.7, quando os comprimentos de coluna são semelhantes (51,0 cm para as figuras 4.4 e 4.5 e 17 cm para as 4.6 e 4.7), diferindo apenas nas áreas livres das palhetas. Em ambas as comparações observa-se além das influências da vazão e da velocidade de rotação, as influências do comprimento da coluna e da área livre das palhetas.

Nos casos das figuras 4.4 e 4.5 (comprimento de 51cm), enquanto que na figura 4.4 (palhetas perfuradas) a tendência é somente de crescimento da dispersão com a vazão, na figura 4.5 (palhetas compactas), aparecem os chamados “picos de dispersão”.

Já nos casos das figuras 4.6 e 4.7, onde se dispõe do comprimento de 17 cm, o processo inverso acontece, ou seja, enquanto que na figura 4.6 (palhetas compactas) a tendência é de crescimento, na figura 4.7 (palhetas perfuradas) existe a tendência é da formação dos “picos”.

Fica evidente portanto que os gráficos (Coeficiente de Dispersão Axial “versus” Vazão), além de apresentarem uma tendência geral de crescimento, podem mostrar também comportamentos ou formas diferentes, a medida que são alterados os parâmetros geométricos, comprimento da coluna e a área livre das palhetas.

Diante das várias comparações e justificativas apresentadas na presente análise conclui-se que a vazão de escoamento contribui significativamente para o aumento da dispersão axial, já que este parâmetro também não deixa de ser um fator de agitação presente nos estágios da coluna. Porém a combinação da vazão com os outros parâmetros analisados, como a área livre das palhetas, a altura da coluna e a velocidade de rotação podem introduzir a formação de “picos de dispersão” nos níveis de mistura. Estes “picos” foram sempre percebidos principalmente quando existia a combinação vazão/velocidade de rotação com valores elevados.

Nesta análise o que se percebe também é o início da identificação de faixas de operação da coluna. Por exemplo, para as colunas com 51cm e palhetas perfuradas ou as com 17cm e palhetas compactas, bons níveis de dispersão são atingidos acima da vazão de 12ml/s. Enquanto que para as com 51cm e palhetas compactas ou as com 17cm e palhetas perfuradas os melhores níveis de dispersão são atingidos com vazões menores, ou seja, entre 8 e 12ml/s.

4.3 - INFLUÊNCIA DA ALTURA DA COLUNA NA DISPERSÃO AXIAL

A altura ou o comprimento total da coluna é também um parâmetro importante na avaliação do desempenho do equipamento com relação à dispersão axial. Este parâmetro está diretamente ligado ao percurso feito pelo traçador, desde o ponto de injeção até o de coleta das amostras, pois é de se esperar que quanto maior o percurso percorrido pelo traçador maior o contato deste com a fase contínua e maior a mistura na coluna. Como já se foi mencionado os experimentos realizados constaram de testes traçador tipo pulso.

Este estudo foi realizado utilizando-se 3 pontos de tomadas de amostras ao longo da coluna que significavam 3 alturas diferentes de coluna. Assim, ao invés de se utilizar 3 colunas com comprimentos diferentes, optou-se por uma maneira mais simples, ou seja, uma mesma coluna com 3 pontos diferentes de amostragem. Isto simplificou bastante a marcha experimental já que não havia a necessidade de desmonte e montagem da coluna para os testes com novos comprimentos.

Os três comprimentos testados foram os de 17, 34 e 51cm, conforme mostrado na figura 4.8, enquanto que os resultados obtidos são mostrados nas tabela 4.1 e 4.2.

Um detalhe deve ser salientado com relação à técnica empregada neste estudo, diz respeito ao modelo utilizado para a determinação do Coeficiente de Dispersão Axial, E. Como já foi especificado anteriormente os experimentos constaram de injeções de traçador na base da coluna e coletas simultâneas de amostras nos 3 estágios da coluna. Ou seja, para cada intervalo de tempo coletava-se 3 amostras simultaneamente em 3 pontos ou 3 alturas de coluna.

Para o cálculo do Coeficiente de Dispersão Axial utilizou-se o Modelo Diferencial da Dispersão para sistemas fechados para as 3 alturas de coluna, mesmo sabendo-se que nas alturas intermediárias (17cm e 34cm), a coluna não se comportava como um sistema fechado e sim um sistema semi-aberto. Este

detalhe foi tomado como efeito de simplificação do estudo já que a pesquisa se tornaria muito mais longa caso se fosse considerar os dois modelos de dispersão distintos para analisar somente a influência de um único parâmetro no desempenho do aparelho. Porém, não deixa de ser um sugestão importante para futuros trabalhos o estudo comparativo dos modelos semi-aberto e fechado na avaliação do comprimento de coluna, utilizando-se a mesma técnica empregada no presente trabalho.

Conforme já descrito anteriormente, os resultados experimentais obtidos no presente estudo estão listados nas tabelas 4.3 e 4.4, onde são comparados os valores encontrados para o Coeficiente de Dispersão Axial para colunas com 17cm (E_{17}) e os para colunas com 51cm (E_{51}). Como não foi possível agrupar todos os dados em uma só tabela optou-se então por dividi-las em dois grupos. Na tabela 4.3 são listados todos os resultados referentes às colunas com áreas livres de palhetas de 0% ou palhetas compactas, enquanto que na tabela 4.4 os dados referentes às colunas com palhetas perfuradas (14% de área livre).

Nesta análise também deve-se salientar que apesar de ter-se obtido dados de dispersão axial para as colunas com os 3 comprimentos distintos, verificou-se que não havia uma boa clareza nestes dados para as 3 alturas. Ou seja, cada um dos conjuntos de 3 dados não mostravam uma tendência de comportamento mais nítida. Entretanto quando avaliou-se somente os dados para colunas com as alturas 17 e 51cm (sem avaliar a altura 34cm), ficou bem mais clara a tendência mostrada pelos dados. Isto comprova inclusive que para uma análise de 3 alturas, neste tipo de coluna, tanto o comprimento total da coluna quanto a altura dos estágios devem ser aumentados a fim de que os pontos de amostragem possam ficar mais distantes, ou mais espaçados uns dos outros e assim se possa avaliar com melhor nitidez a influência do comprimento da coluna. Logo nesta seção foram avaliados somente os dados para os comprimentos 17 e 51cm, portanto não foram levados em conta os dados obtidos para o comprimento 34cm.

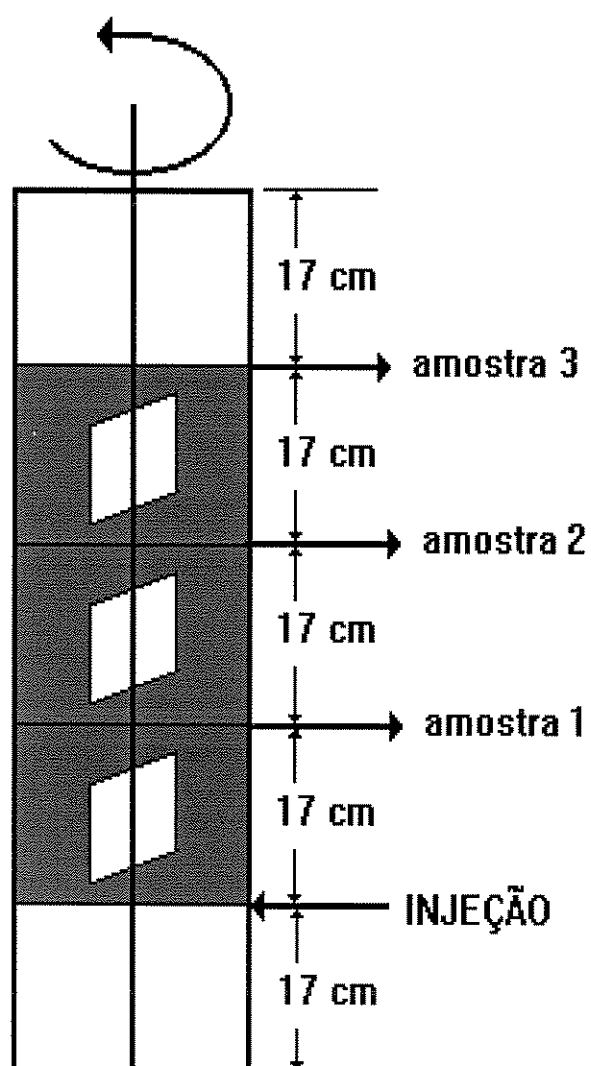


Figura 4.8 - Detalhe dos pontos de coleta de amostras da coluna

Tabela 4.1- Análise da influência do Comprimento da Coluna na Dispersão Axial (palhetas compactas)

Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E_{17} (cm ² /s)	E_{51} (cm ² /s)
3.02	0.0	2.4938	1.1912
5.37	0.0	3.9647	1.7393
7.73	0.0	4.7124	2.9550
10.09	0.0	4.9072	2.4140
12.45	0.0	1.7882	3.4136
3.02	1.0	0.6451	1.1268
5.37	1.0	1.4626	1.7228
7.73	1.0	6.7762	2.1239
10.09	1.0	2.8324	2.7409
12.45	1.0	4.4718	3.0809
3.02	2.0	2.9562	1.4312
5.37	2.0	2.0691	1.8841
7.73	2.0	2.1280	2.0440
10.09	2.0	5.7893	2.3543
12.45	2.0	6.1896	2.5063
3.02	3.0	1.5252	1.6106
5.37	3.0	1.9222	2.4875
7.73	3.0	2.0110	2.2085
10.09	3.0	6.5184	3.9168
12.45	3.0	7.3793	3.3426
3.02	4.0	1.6845	2.0905
5.37	4.0	3.4980	2.7725
7.73	4.0	4.8597	3.1446
10.09	4.0	5.4301	5.2896

Tabela 4.1- continuação

Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E ₁₇ (cm ² /s)	E ₅₁ (cm ² /s)
12.45	4.0	6.1859	5.0533
3.02	5.0	2.4303	2.4854
5.37	5.0	2.6647	3.2849
7.73	5.0	2.9582	3.5289
10.09	5.0	4.9382	8.8855
12.45	5.0	7.5967	4.3332

Analisando-se de uma maneira geral todos os resultados obtidos, tanto os mostrados na tabela 4.1 como os da tabela 4.2, verifica-se a primeira vista que os da tabela 4.1 (palhetas compactas) os níveis de dispersão mostrados são melhores para as colunas com comprimentos menores, com exceção dos casos de velocidade de rotação mais elevadas (5 r.p.s.). Já nos da tabela 4.2 (palhetas perfuradas) ocorre justamente o inverso, ou seja, os níveis de dispersão para as colunas com alturas mais elevadas são maiores que os obtidos para as com alturas reduzidas.

A influência do comprimento da coluna a primeira vista, pode ser baseada na intensidade do caminho axial percorrido pelo traçador, desde o seu ponto de injeção até o de amostragem. Então, de acordo com esta perspectiva, era de se esperar que nas colunas com maiores alturas os níveis de dispersão fossem também mais elevados. Porém, conforme já descrito, verificou-se que este comportamento só foi observado nos dados da tabela 4.2 quando se utilizou palhetas perfuradas, enquanto que nos da tabela 4.1 aconteceu justamente o inverso. Novamente, como nas análises anteriores, verifica-se que os parâmetros comprimento de coluna e área livre de palhetas estão intrinsicamente ligados um ao outro, além da velocidade de rotação também

apresentar a sua influência, o que mais uma vez mostra que fica difícil analisar a influência de cada parâmetro individualmente neste tipo de equipamento. Além de se considerar o caminho percorrido pelo traçador na direção axial, deve-se também levar em conta a intensidade do movimento na direção radial nos estágios, que pode ser até mais influente que o axial. Este movimento é causado principalmente pela velocidade de rotação e pela área livre das palhetas.

Avaliando-se primeiramente os dados mostrados na tabela 4.1, conforme já mencionado, melhores resultados foram obtidos para colunas com menores alturas, com exceção das que foram utilizadas velocidades de rotação mais elevadas (5,0 r.p.s.). A justificativa deste fenômeno baseia-se no fato de que para as colunas com comprimentos menores e palhetas compactas, a não existência dos furos nas palhetas deve fazer com que a massa de traçador se concentre nos primeiros estágios da coluna, sem conseguir se dispersar ao longo dos estágios superiores. Isto deve induzir a que o traçador permaneça um maior espaço de tempo nos primeiros estágios da coluna. Como no estágio 1, que corresponde a altura 17cm também se localiza o ponto de injeção de traçador, os índices de mistura neste estágio devem ser bem maiores que os dos estágios superiores, ou nas colunas com maiores alturas. Porém quando a velocidade de rotação se torna mais intensa o escoamento radial fica ainda maior, o que deve fazer com que a mistura se propague, ou que aconteça uma maior dispersão do corante em toda a extensão da coluna.

No caso dos dados mostrados na tabela 4.2 o inverso acontece, ou seja, melhores resultados obtidos para as colunas com maiores comprimentos. Este fato confirma a expectativa inicial e tem justificativa novamente baseada em que com as palhetas perfuradas e maiores alturas o tempo de permanência do traçador é aumentado, o que deve fazer com que primeiro o escoamento empistonado seja evitado e, segundo que o caminho percorrido pelo traçador na coluna seja aumentado devido a recirculação do traçador nos estágios entre os

Tabela 4.2 - Análise da influência do Comprimento da Coluna na Dispersão.

Axial. (palhetas perfuradas)

Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E ₁₇ (cm ² /s)	E ₅₁ (cm ² /s)
3.02	0.0	0.5443	1.1543
5.37	0.0	1.1137	2.6246
7.73	0.0	1.4855	2.2211
10.09	0.0	1.7683	2.7520
12.45	0.0	1.9699	5.7165
3.02	1.0	1.1682	0.9246
5.37	1.0	0.9022	1.2929
7.73	1.0	2.8256	2.7475
10.09	1.0	4.8284	2.2132
12.45	1.0	4.8072	4.7941
3.02	2.0	1.1151	1.3250
5.37	2.0	1.9630	2.3668
7.73	2.0	3.1191	1.9676
10.09	2.0	4.4389	3.2858
12.45	2.0	3.7763	3.4643
3.02	3.0	1.4423	1.5743
5.37	3.0	2.2212	2.8637
7.73	3.0	2.4365	3.1091
10.09	3.0	3.8246	4.0521
12.45	3.0	3.6210	5.2624
3.02	4.0	1.3293	1.6602
5.37	4.0	1.6799	3.2589
7.73	4.0	1.2389	3.4900
10.09	4.0	3.5116	4.1083

Tabela 4.2 - continuação

Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E ₁₇ (cm ² /s)	E ₅₁ (cm ² /s)
12.45	4.0	3.6578	6.5899
3.02	5.0	0.8405	1.0962
5.37	5.0	1.5074	2.1942
7.73	5.0	1.9182	3.6715
10.09	5.0	1.9347	3.3717
12.45	5.0	2.6507	3.4070

furos das palhetas. E assim, com maiores caminhos percorridos pelo traçador melhores índices de mistura devem ser obtidos.

As justificativas referentes à forma de movimentação do traçador nos estágios da coluna devido à área livre das palhetas serão comentadas na seção seguinte quando analisada a influência da área livre das palhetas na dispersão axial.

Assim, com relação à influência do comprimento da coluna na dispersão, conclui-se que esta influência é condicionada primeiramente ao caminho percorrido pelo traçador na coluna, ou seja, maiores comprimentos resultam em dispersões mais elevadas. Porém, diante da combinação deste parâmetro principalmente com a área livre de escoamento das palhetas ou com a velocidade de rotação, resultados invertidos podem vir a ser obtidos devido à forte tendência de escoamento radial provocado por este parâmetro. Como outra observação importante pode-se citar que nesta combinação de parâmetros não foi percebida a influência da vazão de líquido.

4.4 - INFLUÊNCIA DA ÁREA LIVRE DAS PALHETAS NA DISPERSÃO AXIAL

O estudo da influência da área livre das palhetas rotativas na dispersão axial foi também realizado utilizando-se tabelas de dados já que, como foram utilizadas somente duas geometrias de palhetas (0% e 14%), não tinha nenhum sentido construir gráficos dispersão axial “versus” área livre de palhetas com somente dois pontos para serem analisados.

Antes de entrar na análise mais profunda dos comportamentos encontrados para este assunto, vale a pena observar primeiramente os detalhes do movimento do fluido nos estágios da coluna para cada tipo de palheta empregada. Observando-se os detalhes do movimento do traçador nas figuras 4.9 e 4.10, para cada área livre de palheta empregada, verifica-se primeiramente que no caso da palheta com área livre 0% (palheta compacta) o traçador apresenta uma maior tendência de movimento radial, ou seja, sempre para as bordas da coluna. Este movimento, apesar de influenciar positivamente na mistura com a fase contínua, deve também produzir efeitos indesejáveis como o regresso de traçador base da coluna. Novamente deve-se frisar que estes movimentos estão também condicionados às faixas obtidas para os outros parâmetros (velocidade de rotação, vazão, etc.). Assim o movimento atribuído na figura faz parte de uma análise individual do movimento do traçador provocado pela área livre da palheta.

O movimento do traçador com a palheta perfurada (área livre de 14%) já é um pouco diferente do da palheta compacta. Conforme mostrado na figura 4.10, devido às perfurações estas palhetas devem produzir uma maior circulação do traçador nos estágios da coluna, ou mais fácil passagem do traçador para os estágios seguintes, e com isso uma melhor mistura pode ser obtida com este tipo de palheta. Porém, como nas compactas, estes índices de mistura também estão condicionados à influência dos outros parâmetros.

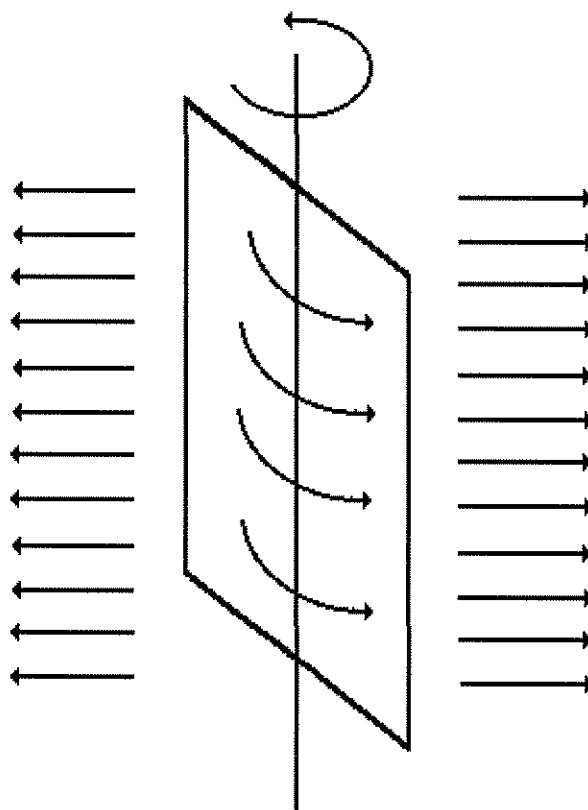


Figura 4.9 - Detalhe da movimentação do fluido no estágio da coluna com a palheta compacta

Com relação aos resultados obtidos de coeficientes de dispersão para este estudo, observou-se nas seções anteriores (estudo da velocidade de rotação e da vazão de líquido), evidências da influência da área livre da palhetas na dispersão. Por exemplo na comparação das figuras 4.7 com 4.5 foi observado claramente que os “picos de dispersão” formados na figura 4.5 (palhetas compactas) são mais acentuados que os da figura 4.7 (palhetas perfuradas). Este fenômeno deve estar associado ao fato de que com uma maior recirculação de

líquido na coluna, as bruscas variações de concentração de traçador são minimizadas. Isto também está de acordo com o sentido de movimentação do traçador mostrado nas figuras 4.9 e 4.10, levando-se em conta que com a predominância da influência da vazão de líquido ou da velocidade de rotação das palhetas, pode acontecer tanto um forte movimento radial do traçador quanto o seu rápido transporte para o todo da coluna.

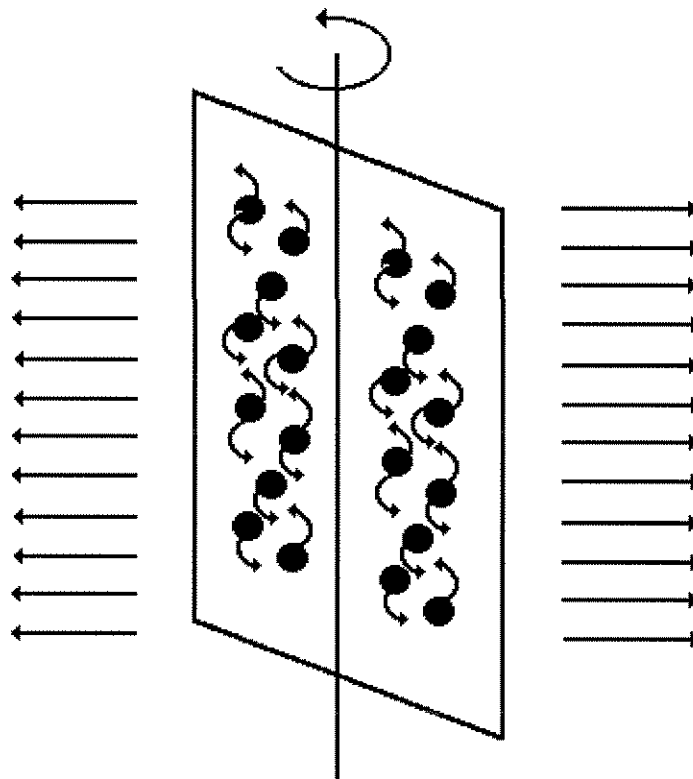


Figura 4.10 - Detalhe da movimentação do fluido no estágio da coluna com a palheta rotativa perfurada

Tabela 4.3 - Influência da área livre das palhetas na Dispersão. Axial
(Altura 17cm)

Veloc. Rot. (r.p.s.)	Vazão (ml/s)	$E_{0,0}$ (cm ² /s)	E_{14} (cm ² /s)
0.00	3.02	2.4938	0.5443
0.00	5.37	3.9647	1.1137
0.00	7.73	4.7124	1.4855
0.00	10.09	4.9072	1.7683
0.00	12.45	1.7882	1.9699
1.00	3.02	0.6451	1.1682
1.00	5.37	1.4626	0.9022
1.00	7.73	6.7762	2.8256
1.00	10.09	6.3731	4.8284
1.00	12.45	4.4718	4.8072
2.00	3.02	2.9562	1.1151
2.00	5.37	2.0691	1.9630
2.00	7.73	2.1280	3.1191
2.00	10.09	5.7893	4.4389
2.00	12.45	6.1896	3.7763
3.00	3.02	1.5252	1.4423
3.00	5.37	1.9222	2.2242
3.00	7.73	2.0110	2.4365
3.00	10.09	6.5184	3.8246
3.00	12.45	7.3793	3.6210
4.00	3.02	1.6845	1.3293
4.00	5.37	3.4980	1.6799
4.00	7.73	4.8597	2.5389
4.00	10.09	5.4301	3.5116

Tabela 4.3 - continuação

Veloc. Rot. (r.p.s.)	Vazão (ml/s)	$E_{0,0}$ (cm ² /s)	E_{14} (cm ² /s)
4.00	12.45	6.1859	3.6578
5.00	3.02	2.4303	0.8405
5.00	5.37	2.6647	1.5074
5.00	7.73	2.9582	1.9182
5.00	10.09	4.9382	1.9347
5.00	12.45	7.5967	0.6507

Uma avaliação mais apurada dos detalhes acima descritos pode ser confirmada com um estudo de mais umas duas ou três faixas de áreas livres de palhetas que não foi feito no presente trabalho, mas que pode vir a ser objeto pesquisas futuras

Na análise dos dados das tabelas vale-se salientar que são apresentadas neste estudo duas tabelas distintas, a 4.3 para os dados com a altura de 17cm e a tabela 4.4 para os dados com a altura de 51cm. Na tabela 4.3 os dados foram agrupados por velocidade de rotação enquanto que nos da tabela 4.4 por vazão, já que esta foi a melhor forma encontrada para listar estes dados para uma melhor avaliação.

Conforme já percebido nas análises anteriores todos os parâmetros estudados até aqui influenciam, de uma forma ou de outra, nos níveis de mistura na coluna. A área livre das palhetas, como não poderia deixar de ser, também apresenta sua contribuição conforme já foi apresentado no início desta seção. Nas palhetas compactas acontece uma maior predominância do escoamento radial enquanto que nas perfuradas uma maior recirculação de fluido nos estágios da coluna.

Primeiramente avaliando-se os dados dispostos na tabela 4.3 observa-se que na maioria dos experimentos comparados, os resultados para as palhetas compactas ($E_{0,0}$) foram superiores que os para as perfuradas (E_{14}), principalmente nos casos em que se utilizaram velocidades de rotação mais elevadas. Isto não quer dizer, de maneira nenhuma, que em todos os experimentos acontece esta tendência, pois conforme observa-se na tabela existem algumas comparações de dados em que os resultados são invertidos. Porém, analisando-se a maioria dos resultados comparados, observa-se que esta tendência se verifica.

O observado na tabela 4.3, confirma portanto uma das expectativas, não todas, já que a expectativa inicial era a de que a tendência geral fosse de melhores resultados para as palhetas perfuradas. Porém o que se confirma é o que já vinha sendo dito, que dependendo dos níveis de velocidade de rotação e de vazão, o movimento do traçador pode ser mais radial ou mais axial.

No caso estudado na tabela 4.3 o que se observa é que para colunas com menores comprimentos (17cm), as palhetas compactas funcionam bem melhor que as perfuradas, principalmente quando a velocidade de rotação é mais elevada. Ou seja, nestes casos o movimento radial do traçador é mais influente. Esta justificativa inclusive já tinha sido descrita na análise anterior, referente à influência do comprimento da coluna, e aqui portanto vem a ser confirmada.

No caso da tabela 4.4 para as alturas de 51cm os dados foram dispostos para grupos de vazão e não para velocidade de rotação, como na tabela 4.3. Nesta tabela a percepção dos resultados não é tão nítida quanto na anterior, já que existe uma certa alternância de comportamentos nas comparações dos experimentos. Porém observando-se cuidadosamente todos os resultados, verifica-se que na faixa de vazão mais baixa (3,02 ml/s) os melhores resultados foram obtidos para as palhetas compactas. Nas demais faixas de vazão, entretanto, o que se observa é uma tendência de inversão destes dados a medida que a vazão vai aumentando, ou seja, a medida que a vazão vai se aproximando

Tabela 4.4 - Análise da influência da área livre das palhetas na Dispersão Axial
(Altura 51cm)

Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	$E_{0,0}$ (cm ² /s)	E_{14} (cm ² /s)
3.02	0.0	1.1912	1.1543
3.02	1.0	1.1268	0.9246
3.02	2.0	1.4312	1.3250
3.02	3.0	1.5252	1.4423
3.02	4.0	2.0905	1.6602
3.02	5.0	2.4854	1.0962
5.37	0.0	1.7393	2.6246
5.37	1.0	1.7228	1.2929
5.37	2.0	1.8841	2.3668
5.37	3.0	2.4875	2.8637
5.37	4.0	2.7725	3.2589
5.37	5.0	3.2849	2.1942
7.73	0.0	2.9550	2.2211
7.73	1.0	2.1239	2.7475
7.73	2.0	2.0440	1.9676
7.73	3.0	2.2085	3.1091
7.73	4.0	3.1446	3.4900
7.73	5.0	3.5289	3.6715
10.09	0.0	2.4140	2.7520
10.09	1.0	2.7409	2.2132
10.09	2.0	2.3543	3.2858
10.09	3.0	3.9168	4.0521
10.09	4.0	3.1446	3.4900
10.09	5.0	5.2896	4.1083

Tabela 4.4 - continuação

Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	$E_{0,0}$ (cm ² /s)	E_{14} (cm ² /s)
12.45	0.0	3.4136	5.7165
12.45	1.0	3.0809	4.7941
12.45	2.0	2.5063	3.4643
12.45	3.0	3.3426	5.2624
12.45	4.0	5.0533	6.5899
12.45	5.0	4.3332	3.4070

de 12,45ml/s, os pontos de maior coeficiente de dispersão vão tendendo a ser para palhetas perfuradas (E_{14}). O que se conclui dos dados desta tabela é que aqui a influência predominante foi a da vazão ou seja, com alturas maiores e vazões mais elevadas as palhetas perfuradas são mais indicadas que as compactas, enquanto que para vazões menores as compactas apresentam-se como mais eficientes.

Deste estudo avaliativo da influência da área livre das palhetas pode-se portanto concluir que existem os casos em que as palhetas compactas se comportam melhor que as perfuradas e vice versa, dependendo dos outros parâmetros. No caso das colunas menores as compactas apresentam melhores resultados, porém nos casos das colunas maiores as perfuradas são mais eficientes, excluindo-se as situações das vazões mais baixas onde as compactas oferecem melhores resultados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Diante do que foi apresentado nos capítulos anteriores, principalmente neste último, o capítulo 4, onde todos os resultados encontrados foram analisados, sobre o extrator de palhetas rotativas desenvolvido no presente trabalho, nesta seção é apresentada uma análise conclusiva a respeito de todos os detalhes e observações verificadas no estudo, referente aos comportamentos de mistura que se processaram no aparelho.

As conclusões descritas devem ser consideradas somente para as faixas de operação que foram testadas, já que diante das particularidades inerentes ao aparelho fica difícil estimar os parâmetros estudados em outras faixas.

Como o presente estudo trata da avaliação do comportamento de mistura ou da dispersão axial, apresentado pelo equipamento diante das variações dos parâmetros de operação e de construção, será apresentada uma descrição das conclusões encontradas com a análise de cada um dos parâmetros individualmente e em seguida, será feita uma abordagem geral sobre as conclusões parciais.

Como primeira conclusão pode-se citar uma grande dependência entre os parâmetros de operação, no caso a velocidade de rotação e a vazão de líquido, e entre os de construção, o comprimento da coluna e a área livre das palhetas. Apesar de que na combinação das variáveis de construção a velocidade de rotação também ter apresentado grande influência. Esta dependência foi tão forte que praticamente não foi possível analisar a influência de cada um dos parâmetros separadamente sem que não houvesse a necessidade de citar os outros.

Com relação aos parâmetros de operação, velocidade de rotação e vazão de líquido, verificou-se o esperado, ou seja, a coluna apresentou melhores índices de mistura quando os níveis destes parâmetros eram mais elevados. Como detalhe desta análise pôde-se verificar a formação dos “picos de dispersão”, de ascensão ou de queda, que ocorriam decorrentes da influência dos parâmetros de operação, área livre das palhetas ou do comprimento da coluna.

Assim, como conclusão referente às influências destes dois parâmetros pode-se citar que ambos atuam no sentido de promover maior agitação na coluna, o que provoca melhores índices de mistura.

Como melhores faixas de trabalho encontradas para o equipamento, primeiramente para a vazão, cita-se a faixa que se situa entre 8 e 10 ml/s, onde na maioria das análises apresentou bons níveis de mistura. Para a velocidade de rotação pode-se indicar a faixa de 2,5 a 4 r.p.s., também oferecendo bons resultados de mistura. Esta é uma análise geral relacionada com a influência destes dois parâmetros, porém um estudo posterior poderá vir a ser realizado para verificar a influência, por exemplo, do produto destes parâmetros, que poderá completar esta análise.

Quanto aos outros parâmetros, ou os de construção, comprimento e área livre de palhetas, o que se verificou foi que as palhetas perfuradas só funcionaram bem com as colunas com alturas mais elevadas e também com vazões mais elevadas. Enquanto que as compactas se comportaram melhor para as colunas com comprimentos inferiores independentemente das faixas de vazão ou de velocidade de rotação.

De acordo com as conclusões abordadas pode-se também chegar à uma conclusão mais geral ainda na indicação de uma condição ou faixa ótima de operação da coluna, levando-se em conta tanto a geometria quanto a operação. Esta condição poderá ser portanto a seguinte: utilizar a coluna com comprimento maior e palhetas perfuradas, com vazão entre 8 e 10 ml/s e velocidade de rotação entre 2,5 e 4,0 r.p.s. Estas seriam então as melhores condições de operação indicadas no presente trabalho para este tipo de coluna, ou seja as condições que, em média, reproduzem os melhores índices de mistura. Lógico que existem outros casos, ou condições de operação, fora desta faixa, que podem produzir resultados até superiores ao obtidos na faixa indicada. Porém o objetivo aqui é indicar a condição mais genérica possível, associando o maior número de

parâmetros, de como trabalhar com este tipo de equipamento, e esta combinação é portanto a mais satisfatória.

Em resumo:

O objetivo foi medir o grau de mistura e verificar como variáveis geométricas e operacionais iriam influenciar na dispersão e como síntese das principais conclusões pode-se citar as seguintes:

- 1- Grande ligação entre velocidade de rotação e vazão
- 2- Existência de regiões de instabilidade
- 3 - Variáveis operacionais interligadas com as geométricas
- 4 - Palhetas compactas necessário considerar direção radial
- 5 - Melhor faixa de operação
 - 5.1 - Velocidade de Rotação - 2,5 a 4,0 r.p.s.
 - 5.2 - Vazão - 8,0 a 10 ml/s
 - 5.3 - Altura - 51cm
 - 5.4 - Palhetas Perfuradas

Vale-se salientar também que este é um estudo preliminar para este tipo de coluna e que para uma avaliação mais ampla, torna-se necessário algumas outras avaliações e análises que devem completar a presente pesquisa. Sugestões a este respeito se encontram portanto listadas no capítulo seguinte.

Analisando-se todos os comportamentos, conclusões e detalhes apresentados pelo extrator estudado, conclui-se também que a utilização deste equipamento pode ser perfeitamente viável em processos industriais de extração, podendo inclusive vir a tornar-se uma nova alternativa com relação aos equipamentos convencionais que são utilizados atualmente nas operações de separação líquido-líquido.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestões para futuras pesquisas que possam vir a surgir com relação ao extrator de palhetas rotativas aqui desenvolvido pode-se indicar as seguintes:

- 1 - Estudo da dispersão axial em duas fases
- 2 - Avaliação da dispersão axial utilizando outros modelos de determinação do Coeficiente de dispersão, como por exemplo, o Modelo da Dispersão em Estágios
- 3 - Estudo comparativo entre os modelos de determinação do Coeficiente de Dispersão existentes na literatura.
- 4 - Avaliação da influência da altura, ou do comprimento da coluna, utilizando-se para isso os modelos de dispersão semi-aberto para as alturas menores, e comparar com os resultados obtidos com o modelo aqui utilizado.
- 5 - Ampliação da faixa de variação da área livre das palhetas. No presente trabalho testou-se somente as compactas (área livre 0,0%) e as perfuradas (área livre 14%). Sugere-se que se utilize mais umas duas ou três áreas livres de palhetas.
- 6 - Variação na forma do arranjo dos furos das palhetas.
- 7 - Avaliação da influência do comprimento da coluna na dispersão axial utilizando colunas com altura total mais elevada, a fim de que se possa ter os pontos de tomadas de amostras mais espaçados uns dos outros.
- 8 - Determinação de equação, ou equações de modelagem, para o Coeficiente de Dispersão Axial, utilizando o maior número possível de variáveis.
- 9 - Avaliação da influência do conjunto (produto, quociente, etc.) de parâmetros $N.Q$ (velocidade-vazão de líquido) na dispersão axial.
- 10 - Avaliação do desempenho da coluna através de outros estudos como por exemplo, diâmetro médio de gota, “holdup”, eficiência de separação, HTU, etc.

- 11 - Comparar os resultados de dispersão axial aqui obtidos com os encontrados para outros tipos de colunas de extração, como por exemplo a de discos rotativos (RDC).

Além destas sugestões pode-se fazer ainda algumas outras, com relação às modificações no desenho da coluna, como por exemplo, variação na área livre dos distribuidores de fluxo, adaptação de espaços com recheios, adaptação de “chicanas” entre os pratos, etc. Porém estas modificações devem ser feitas de modo a não descaracterizar o tipo de extrator estudado.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aerov M. E. et al; "Coefficients of Longitudinal Mixing in Rotary-Disk Extractors", J. Ap. Chem. USSR, V.36, 1932 (1963)
- Baird, M. H. I. et al, "Axial Mixing and Mass Transfer in a Vibrating Perforated Plate Extraction Column", Can. J. Chem. Eng. V.70, 69-76 (1992).
- Gayler, R. et al, "Liquid-Liquid Extraction: Part IV - A Further Study of Hold-up in Packed Columns", Trans. Chem. Engrs., V.31, (1953)
- Gois, L. M. N. "Estudo e Desenvolvimento de um Contactor de Discos Rotativos", Tese de Mestrado", FEQ/DEQ/UNICAMP (1987)
- Hafez, M. M. et al, "Flooding and Axial Dispersion in Reciprocating Plate Extraction Columns", Can. J. Chem. Eng., V.57, 150, 150-157 (1979)
- Heyberger, A. et al, "Holdup and Flooding in a Vibrating Plate Extractor", Col. Cze. Chem. Com., V.48, 989-100 (1983).
- Hinze, J. O.; "Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Process", A.I.Ch.E. J. , V.1, 289 (1955)
- Kagan S. Z. et al, "Some Hydrodynamic and Mass-Transfer Problems in Pulsed Sieve-Plate Extractors", Chem. Eng., V.4, 656-661(1965)
- Kim, S. D. e Baird, H. I., "Axial Dispersion in a Reciprocating Plate Extraction Column", Can. J. Chem. Eng., V.54, 81-89 (1976).
- Kumar, A. e Hartland, S.; "Independent Prediction of Slip Velocity and Hold-up in Liquid/Liquid Extraction Columns", Can. J. Chem. Eng., V.67,17 (1988)
- Kumar, A. e Hartland, S.; "Prediction of Axial Mixing Coeffilcients in Rotating Disc and Asymetric Disc Extraction Columns", Can. J. Chem. Eng., V.70, 77 (1992)
- Kung, E. Y. e Beckman, R. B.; "Dispersed-Phase Hold-up in a Rotating Disc Extraction Column", A.I.Ch.E. J., V.7,319 (1961)
- Levenspiel, O., "Chemical Reaction Engineering", John Wiley & Sons, New York, 242 (1962).
- Logsdail, D. H. et al, "Liquid-Liquid Extraction Part XII: Flooding Rates and Performance Date for Rotary Disc Contactor", Trans. Inst. Chem. Eng., V.35,

- 301-3151 (1957)
- Miyauchi, T. e Vermeulen, T., “Diffusion and Backflow Models for Two-Phase Axial Dispersion”, *I&EC Fund.*, V.2, N.4, 304-309 (1963).
- Novontny, P. et al, “Longitudinal Mixing in Reciprocating and Sieve-Plate Column-Single Phase Flow”, *Can. J. Chem. Eng.* V.48, 405-410 (1970).
- Oliver, E. D.; “Diffusional Separation Process: Theory, Design and Evaluation”, John Wiley & Sons (1966)
- Prvcic et al, “Axial Dispersion in Pulsed-Perforated-Plate Extraction Columns”, *AIChE J.*, V.35, N.11, 1845 (1989).
- Reman, G. H.; “A New Efficient Extraction Apparatus: The Rotating Disc Contactor”, 3rd. World Petrol. Cong. The Hague 1951, section III, 121, Brill, Leiden (Holland) (1951)
- Sleicher, C. A., Axial Mixing and Extraction Efficiency”, *AIChE. J.*, V.5, N.2, 145-149 (1959).
- Souza R. R.; “Estudo da Dispersão Axial numa Coluna de Extração de Pratos Alternativos”, Tese de Mestrado, DESQ/FEQ/UNICAMP (1994)
- Steiner et al, “Determination and Correlation of Axial-Mixing Parameters in an Agitated Liquid-Liquid Extraction Column”, *Can. J. Chem. Eng.*, V.66, 241 (1988).
- Strand et al; “Fundamental Aspect of Rotating Disc Contactor Performance” *A.I.Ch.E.J.* V.8,252 (1962)
- Tambourgi, E. B.; “Estudo da Hidrodinâmica de uma Coluna de Discos Rotativos”, Tese de Doutorado, EPUSP/USP (1989)
- Taylor, G. I., “Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube”, *Proc. Roy. Soc. (Londres)*, 219A, 186 (1953).
- Tojo, K. et al, “Axial Mixing in a Multistage Vibrating Disc Column with Countercurrent Liquid-Liquid flow”, *Chem. Eng. J.*, V.11, 101-104 (1976).
- Vermijs, H. J. A. e Kramers, H. A.; “Liquid-Liquid Extraction in a Rotating Disc Contactor”; *Chem. Eng. Sci.*, V.3, 55 (1954)

Westerterp, K. R. e Ladisman, P.; “Axial Mixing in a Rotating Disc Contactor - II”, Chem. Eng. Sci., V.17, 373 (1962).

APÊNDICES

Neste capítulo são apresentados os Apêndices, ou os Anexos, referentes ao trabalho aqui desenvolvido. Estes apêndices são apresentados da seguinte forma:

No APÊNDICE A são mostrados os dados referentes à calibração dos equipamentos utilizados no trabalho. Então neste apêndice são listados os dados referentes às calibração de um espectrofotômetro e de um rotâmetro, que foram os equipamentos que tiveram necessidade de calibração.

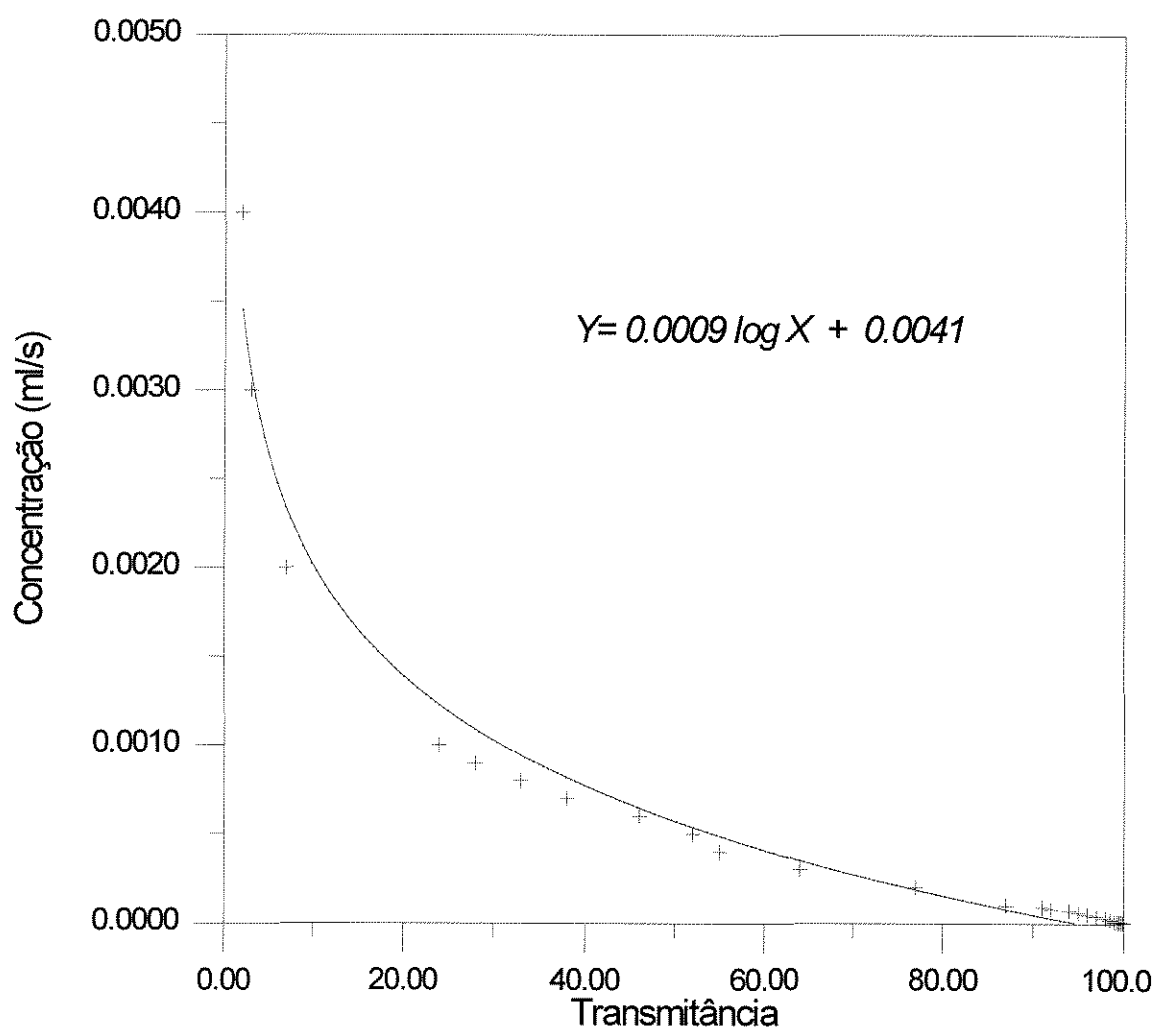
No APÊNDICE B são mostradas algumas Curvas de Distribuição de Tempo de Residência (D.T.R.), obtidas experimentalmente. Estas curvas, concentração adimensional “versus” tempo adimensional, foram obtidas para diferentes condições operacionais e geométricas da coluna.

No APÊNDICE C é listado o programa de computador que foi utilizado na determinação dos valores do Coeficiente de Dispersão Axial em função dos dados de concentração e tempos obtidos dos experimentos.

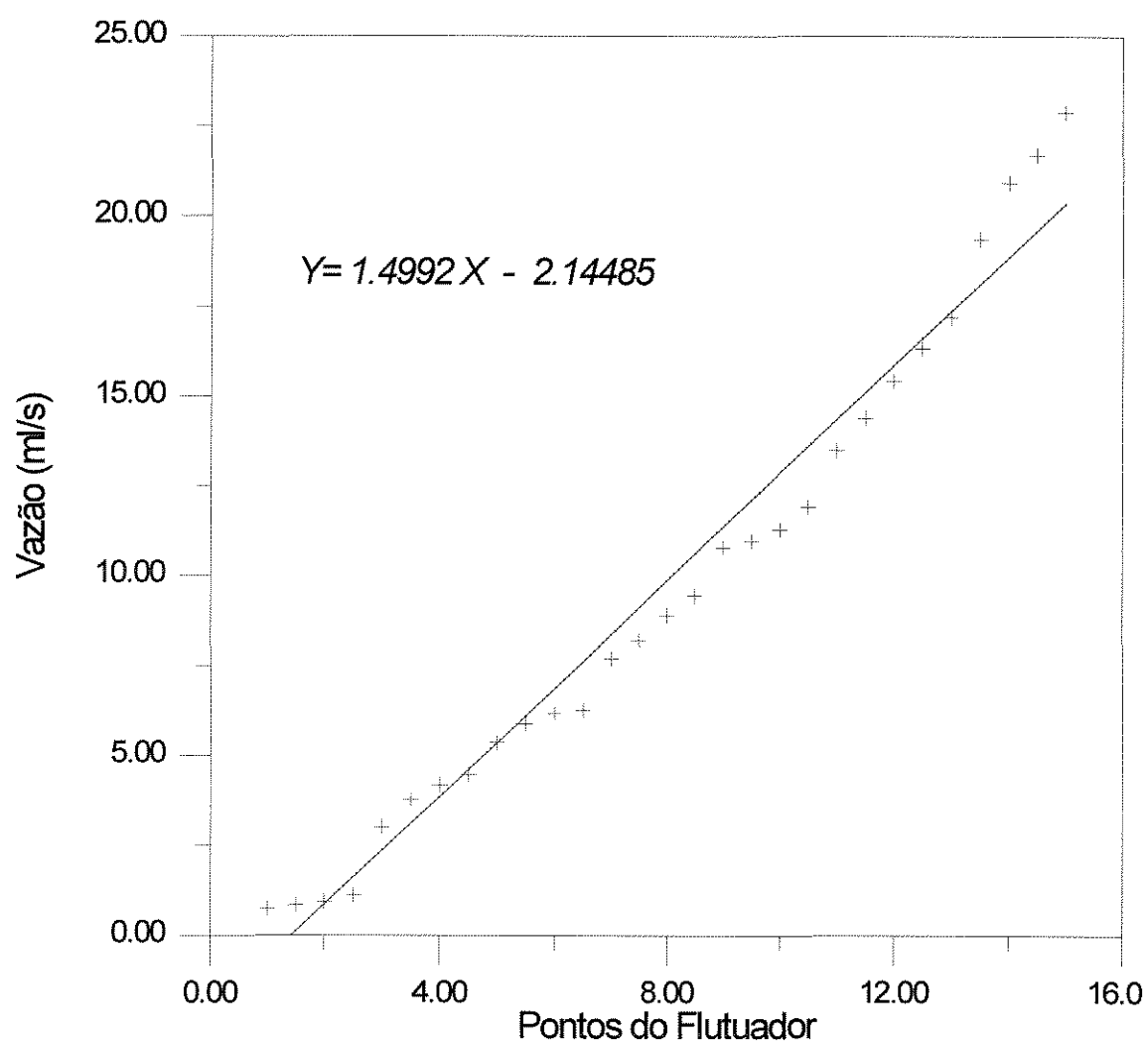
O APÊNDICE D apresenta todos os valores encontrados para o Coeficiente de Dispersão Axial correspondente a cada um dos experimentos realizados. Este apêndice se divide em D.1 e D.2 que corresponde aos resultados referentes às experiências utilizando palhetas compactas e perfuradas, respectivamente.

APÊNDICE A - CURVAS DE CALIBRAÇÃO

A.1 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO



A-2 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ROTÂMETRO



APÊNDICE B - EXEMPLOS DE CURVAS EXPERIMENTAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPO DE RESIDÊNCIA (D.T.R.)

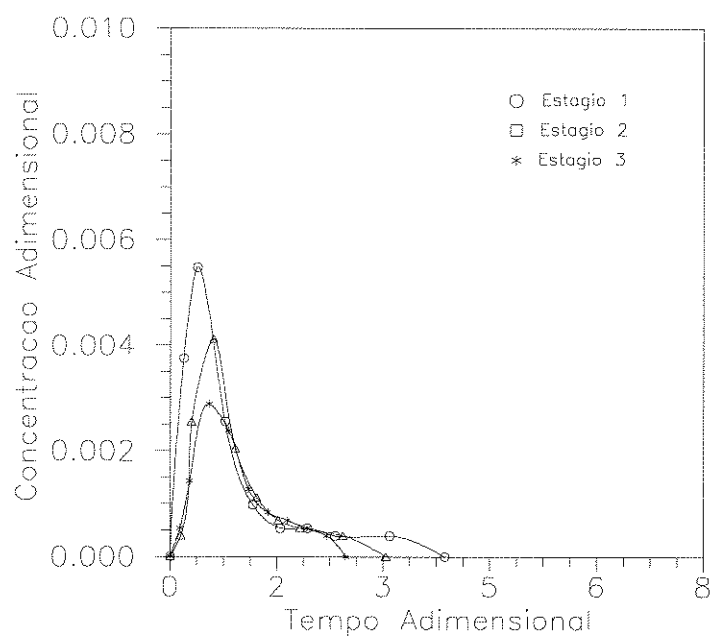


Figura B.1-Palhetas compactas, V. Rot. = 1,0 rps, Vazão = 7,73ml/s

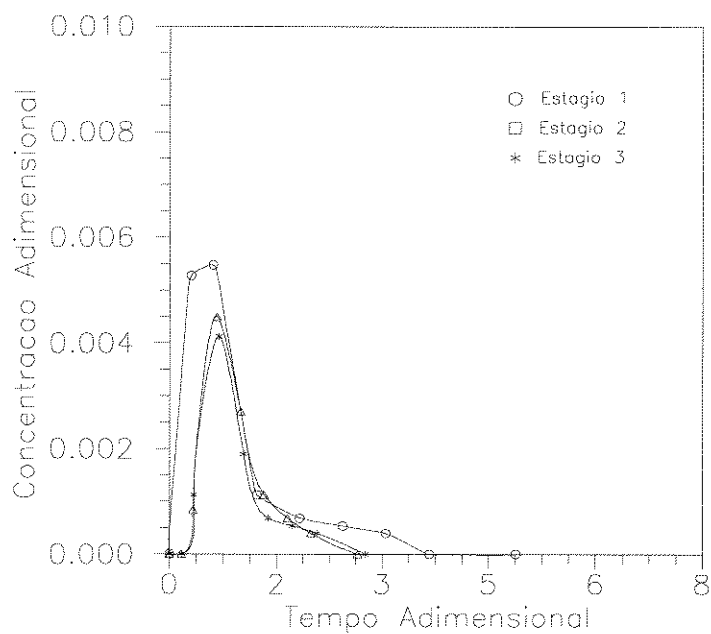


Figura B.2 -Palhetas compactas, V. Rot. = 2,0 rps, Vazão = 10,09 ml/s

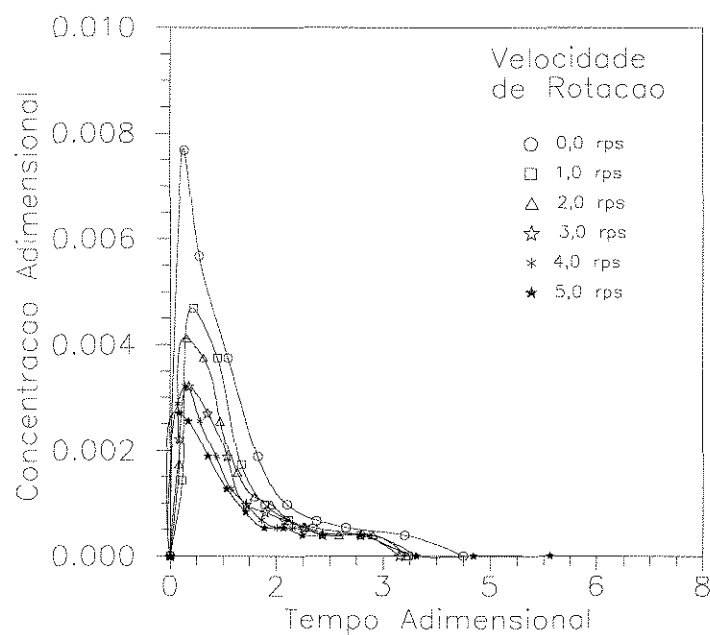


Figura B.3 - Palhetas compactas, Altura = 17cm, Vazão = 5,37ml/s

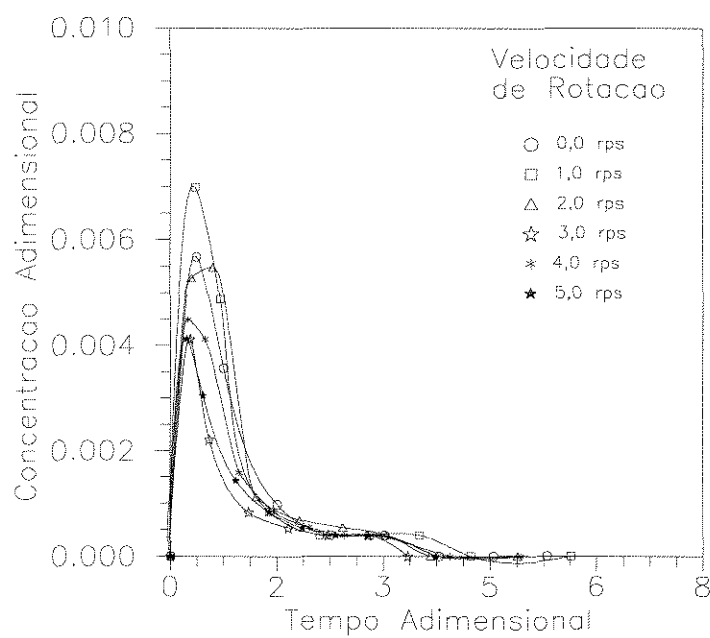


Figura B.4 - Palhetas compactas, Altura = 17cm, Vazão = 10,09ml/s

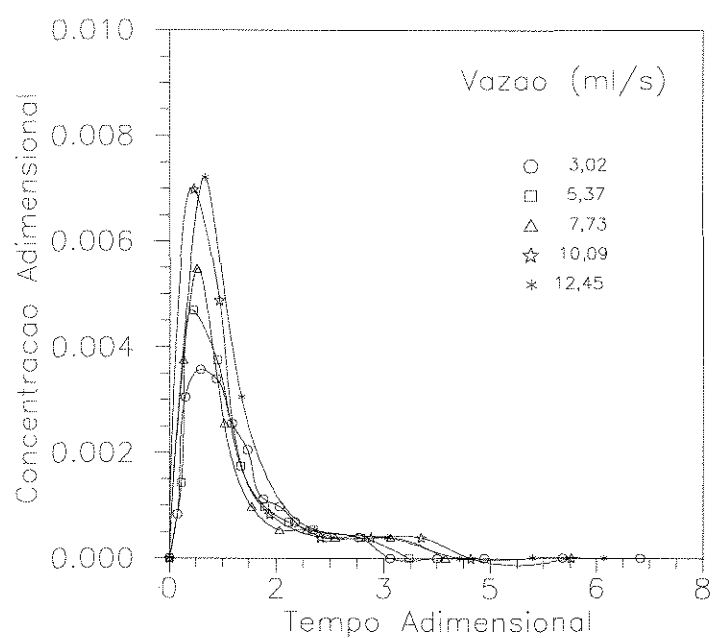


Figura B.5 - Palhetas compactas, Altura = 17cm, V. Rot. = 1,0 rps

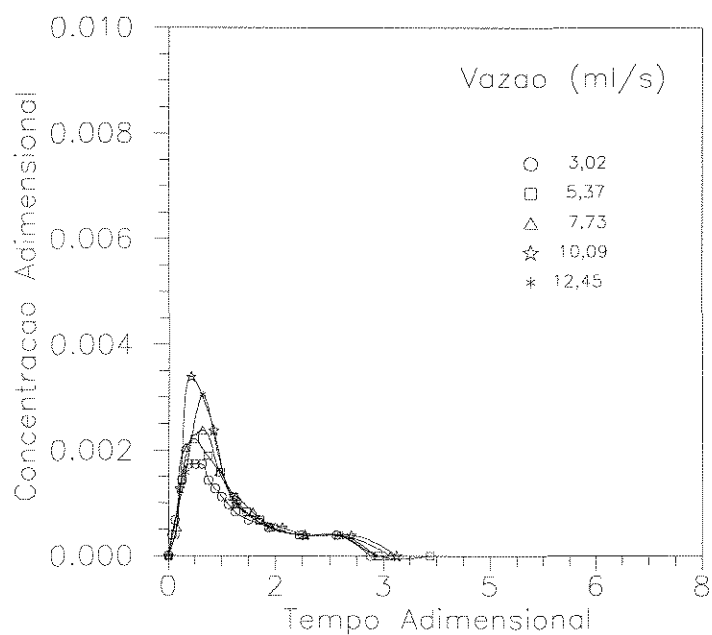


Figura B.6 - Palhetas compactas, Altura = 34cm, V. Rot. = 4,0 rps

APÊNDICE C - PROGRAMA DE COMPUTADOR

O programa apresentado no presente apêndice, programa DISPERSA, foi desenvolvido em linguagem PASCAL, e tem como objetivo principal a determinação dos valores do coeficiente de dispersão axial, para cada experimento realizado, referente ao estudo da mistura axial. Nele são introduzidos como dados de entrada, perfis de transmitância (transmitância “versus” tempo), obtidos de cada experimento. Estes dados foram convertidos a valores de concentração, via equação de calibração e, em seguida, através do modelo diferencial da dispersão, calculado o coeficiente de dispersão axial, E , e o Número de Dispersão, $E/V.L$, necessários na avaliação da intensidade de mistura que ocorre no interior da coluna.

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 = 85;      { cm }
  AREACOL = 23.758; { cm2 }
  D = 5.5;          { cm }
VAR
  CONC, TEMPO, TRANSMIT      : VETOR;
  I, N, OPCA, 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,'] Transmittancia['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.
```

APÊNDICE D - RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS**APÊNDICE D.1 - COLUNAS COM PALHETAS COMPACTAS**

Comprimento cm	Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E (cm ² /s)
17	3.02	0.0	2.4938
17	5.37	0.0	3.9647
17	7.73	0.0	4.7124
17	10.09	0.0	4.9072
17	12.45	0.0	1.7882
17	3.02	1.0	0.6451
17	5.37	1.0	1.4626
17	7.73	1.0	6.7762
17	10.09	1.0	2.8324
17	12.45	1.0	4.4718
17	3.02	2.0	2.9562
17	5.37	2.0	2.0691
17	7.73	2.0	2.1280
17	10.09	2.0	5.7893
17	12.45	2.0	6.1896
17	3.02	3.0	1.5252
17	5.37	3.0	1.9222
17	7.73	3.0	2.0110
17	10.09	3.0	6.5184
17	12.45	3.0	7.3793
17	3.02	4.0	1.6845
17	5.37	4.0	3.4980
17	7.73	4.0	4.8597

APENDICE D.1 - Continuação

Comprimento (cm)	Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E (cm ² /s)
17	10.09	4.0	5.4301
17	12.45	4.0	6.1859
17	3.02	5.0	2.4303
17	5.37	5.0	2.6647
17	7.73	5.0	2.9582
17	10.09	5.0	4.9382
17	12.45	5.0	7.5967
34	3.02	0.0	0.8027
34	5.37	0.0	2.1241
34	7.73	0.0	2.4201
34	10.09	0.0	3.0599
34	12.45	0.0	3.9550
34	3.02	1.0	1.0538
34	5.37	1.0	1.4132
34	7.73	1.0	2.6887
34	10.09	1.0	4.6476
34	12.45	1.0	6.3213
34	3.02	2.0	1.6426
34	5.37	2.0	2.1649
34	7.73	2.0	1.4643
34	10.09	2.0	1.2910
34	12.45	2.0	4.1378
34	3.02	3.0	1.4751
34	5.37	3.0	1.8043
34	7.73	3.0	2.4280

APÊNDICE D.1 - continuação

Comprimento (cm)	Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E (cm ² /s)
34	10.09	3.0	6.0126
34	12.45	3.0	4.4894
34	3.02	4.0	1.8643
34	5.37	4.0	2.7004
34	7.73	4.0	3.7050
34	10.09	4.0	6.7831
34	12.45	4.0	6.8791
34	3.02	5.0	2.1122
34	5.37	5.0	2.7236
34	7.73	5.0	3.7436
34	10.09	5.0	6.1166
34	12.45	5.0	5.3251
51	3.02	0.0	1.1912
51	5.37	0.0	1.7393
51	7.73	0.0	2.9553
51	10.09	0.0	2.4140
51	12.45	0.0	3.4136
51	3.02	1.0	1.1268
51	5.37	1.0	1.7228
51	7.73	1.0	2.1239
51	10.09	1.0	2.7409
51	12.45	1.0	3.0809
51	3.02	2.0	1.4312
51	5.37	2.0	1.8841
51	7.73	2.0	2.0440

APÊNDICE D.1 - continuação

Comprimento (cm)	Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E (cm ² /s)
51	10.09	2.0	2.3543
51	12.45	2.0	2.5063
51	3.02	3.0	1.6106
51	5.37	3.0	2.4875
51	7.73	3.0	2.2085
51	10.09	3.0	3.9168
51	12.45	3.0	3.3426
51	3.02	4.0	2.0905
51	5.37	4.0	2.7725
51	7.73	4.0	3.1446
51	10.09	4.0	5.2896
51	12.45	4.0	5.0533
51	3.02	5.0	2.4874
51	5.37	5.0	3.2849
51	7.73	5.0	3.5289
51	10.09	5.0	8.8555
51	12.45	5.0	4.3332

APÊNDICE D.2 - RESULTADOS OBTIDOS PARA COLUNAS COM PALHETAS
PERFURADAS

Comprimento (cm)	Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E (cm ² /s)
17	3.02	0.0	0.5443
17	5.37	0.0	1.1137
17	7.73	0.0	1.4855
17	10.09	0.0	1.7683
17	12.45	0.0	1.9699
17	3.02	1.0	1.1682
17	5.37	1.0	0.9022
17	7.73	1.0	2.8256
17	10.09	1.0	4.8284
17	12.45	1.0	4.8072
17	3.02	2.0	1.1151
17	5.37	2.0	1.9630
17	7.73	2.0	3.1191
17	10.09	2.0	4.4389
17	12.45	2.0	3.7763
17	3.02	3.0	1.4423
17	5.37	3.0	2.2212
17	7.73	3.0	2.4365
17	10.09	3.0	3.8246
17	12.45	3.0	3.6210
17	3.02	4.0	1.3293
17	5.37	4.0	1.6799
17	7.73	4.0	1.2389
17	10.09	4.0	3.5116
17	12.45	4.0	3.6578
17	3.02	5.0	0.8405

APÊNDICE D.2 - continuação

Comprimento (cm)	Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E (cm ² /s)
17	5.37	5.0	1.5074
17	7.73	5.0	1.9182
17	10.09	5.0	1.9347
17	12.45	5.0	2.6507
34	3.02	0.0	1.0270
34	5.37	0.0	1.9294
34	7.73	0.0	2.3667
34	10.09	0.0	3.1589
34	12.45	0.0	5.0302
34	3.02	1.0	1.3485
34	5.37	1.0	0.7867
34	7.73	1.0	2.7564
34	10.09	1.0	3.3532
34	12.45	1.0	5.5559
34	3.02	2.0	1.3929
34	5.37	2.0	1.8063
34	7.73	2.0	2.4485
34	10.09	2.0	4.3592
34	12.45	2.0	2.9679
34	3.02	3.0	1.2459
34	5.37	3.0	2.6217
34	7.73	3.0	3.2015
34	10.09	3.0	3.3160
34	12.45	3.0	3.7629
34	3.02	4.0	1.5350
34	5.37	4.0	2.6655
34	7.73	4.0	3.2113

APÊNDICE D.2 - continuação

Comprimento (cm)	Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E (cm ² /s)
34	10.09	4.0	4.1122
34	12.45	4.0	5.4270
34	3.02	5.0	0.9547
34	5.37	5.0	1.6328
34	7.73	5.0	2.4447
34	10.09	5.0	1.1991
51	12.45	5.0	2.7099
51	3.02	0.0	1.1543
51	5.37	0.0	2.6246
51	7.73	0.0	2.2211
51	10.09	0.0	2.7520
51	12.45	0.0	5.7165
51	3.02	1.0	0.9246
51	5.37	1.0	1.2929
51	7.73	1.0	2.7475
51	10.09	1.0	2.2132
51	12.45	1.0	4.7941
51	3.02	2.0	1.3250
51	5.37	2.0	2.3668
51	7.73	2.0	1.9676
51	10.09	2.0	3.2858
51	12.45	2.0	3.4643
51	3.02	3.0	1.5743
51	5.37	3.0	2.8637
51	7.73	3.0	3.1091
51	10.09	3.0	4.0521
51	12.45	3.0	5.2624

ÍNDICE D.2 - continuação

Comprimento (cm)	Vazão (ml/s)	Veloc. Rot. (r.p.s.)	E (cm ² /s)
51	3.02	4.0	1.6602
51	5.37	4.0	3.2589
51	7.73	4.0	3.4900
51	10.09	4.0	4.1083
51	12.45	4.0	6.5899
51	3.02	5.0	1.0962
51	5.37	5.0	2.1942
51	7.73	5.0	3.6715
51	10.09	5.0	3.3717
51	12.45	5.0	3.4070