

de exemplo
distinção
qual de Tese defendida
por Edelberto Luiz Reinher
e aprovada pela Banca Examinadora
em 11/11/87
fecho

Engel

Reinher

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS QUÍMICOS

"DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE UMA COLUNA
DE PRATOS PERFURADOS SEM VERTEDORES"

Autor: Edelberto Luiz Reinher

Orientador: João A. F. R. Pereira

19/87

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

Campinas - SP - BRASIL

Novembro - 1987

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

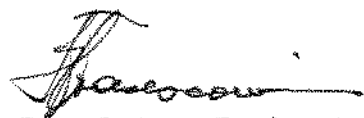
"DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE UMA COLUNA
DE PRATOS PERFURADOS SEM VERTEDORES"

Autor: Edelberto Luiz Reinehr

Tese submetida à comissão de Pós-Graduação da
Faculdade de Engenharia de Campinas - UNICAMP como parte dos
requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em En-
genharia Química.

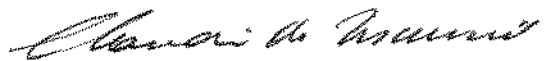
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS QUÍMICOS

APROVADA POR:



Prof. Dr. Artur Zaghini

Francesconi



Prof. Dr. Cláudio Augusto

Oller do Nascimento



Orientador: Prof. Dr. João Alexandre Ferreira
da Rocha Pereira

A MARCIA e RICARDO,

pela compreensão e apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Ferreira pela orientação prestada.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo auxílio financeiro prestado.

Ao Departamento de Engenharia Química - UNICAMP.

A Fundação Universidade Regional de Blumenau - FURB.

A Teresa Massako Kakuta Ravagnani.

Aos professores e aos colegas.

RESUMO

Neste trabalho descreve-se o estudo do comportamento hidrodinâmico de uma coluna de destilação de pratos perfurados sem vertedoras. A coluna tem 5,5 cm de diâmetro interno e a área livre de escoamento de seus pratos foi variada de 9,69% até 39,57%.

Os aspectos hidrodinâmicos estudados com a coluna operando com o sistema etanol-água em condições destilantes e em refluxo total e parcial foram: os regimes de escoamento, a altura da dispersão, o limite inferior de operação, a transição entre os regimes "froth" e "spray" e as oscilações da dispersão. Estes itens são estudados em função das vazões das fases, das propriedades físico-químicas do sistema envolvido e das características geométricas dos pratos perfurados.

Os resultados experimentais mostraram a formação dos regimes de escoamento do tipo "spray", espuma celular, "froth" e a transição entre os regimes "froth" e "spray". O regime de espuma celular só foi observado nos pratos com área livre de escoamento até 19,0%. As oscilações do tipo meia onda e onda completa não foram observadas em nenhum dos experimentos realizados. A altura da dispersão, a transição "froth-spray" e o limite inferior de operação são analisados e apresentam-se correlações para as suas previsões em função das vazões das fases, das suas propriedades físico-químicas e dos parâmetros geométricos dos pratos.

ÍNDICE GERAL

	Página
Resumo	
CAPÍTULO 1 - Introdução	01
CAPÍTULO 2 - Análise da Literatura	05
2.1 - Introdução	06
2.2 - Regimes de Escoamento	07
2.2.1 - Regime de Borbulhamento	13
2.2.2 - Regime de Espuma Celular	18
2.2.3 - Regime "Froth"	18
2.2.4 - Regime "Spray"	21
2.2.5 - Oscilação de Dispersão	24
2.3 - Transição "Froth-Spray"	28
2.4 - Altura da Dispersão	33
2.5 - Ponto de Retenção de Líquido	45
2.6 - Conclusão	53
CAPÍTULO 3 - Equipamento e Procedimento Experimental	54
3.1 - Introdução	55
3.2 - Equipamento Experimental	55
3.2.1 - Coluna de Destilação	55
3.2.2 - Condensador	60
3.2.3 - Reservador	60
3.3 - Mistura Líquida Utilizada	61
3.4 - Procedimento Experimental	63
3.4.1 - Operação em Refluxo Total	63
3.4.2 - Operação em Refluxo Parcial	66

3.4.3 - Determinação do Ponto de Retenção de Líquido	67
3.4.4 - Cálculo das Vazões e das Velocidades das Duas Fases	69
3.4.5 - Medida da Composição da Fase Líquida	71
CAPÍTULO 4 - Análise dos Resultados Experimentais	74
4.1 - Introdução	75
4.2 - Regimes de Escoamento e Tipos de Dispersão	75
4.2.1 - Descrição dos Regimes de Escoamento e das Dispersões	75
4.2.2 - Velocidades das Fases para os Diferentes Regimes	80
4.2.3 - Efeito da Área Livre de Escoamento	84
4.3 - Transição "Froth-Spray"	86
4.4 - Altura da Dispersão	92
4.4.1 - Influência das Velocidades do Vapor e do Líquido	93
4.4.2 - Influência da Área Livre de Escoamento	101
4.4.3 - Influência da Concentração Inicial de Etanol do Reservador	101
4.5 - Ponto de Retenção de Líquido	108
4.6 - Oscilações da Dispersão	111
4.7 - Conclusão	113
CAPÍTULO 5 - Modelagem	114
5.1 - Introdução	115
5.2 - Altura da Dispersão	116
5.3 - Ponto de Retenção de Líquido	121
5.4 - Transição "Froth-Spray"	124
5.5 - Conclusão	127

CAPÍTULO 6 - Conclusões e Sugestões	128
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
APÊNDICE A - Cálculo da Fração Molar de Etanol no Vapor a Partir da Composição da Fase Líquida	140
APÊNDICE B - Cálculo da Temperatura em Função da Composição da Fase Líquida	141
APÊNDICE C - Cálculo da Tensão Superficial do Sistema Etanol-Água	142
APÊNDICE D - Cálculo da Viscosidade Dinâmica do Sistema Etanol-Água no Estado Líquido	143
APÊNDICE E - Cálculo da Viscosidade Dinâmica da Mistura na Fase Vapor	145
APÊNDICE F - Cálculo da Massa Específica das Fases	146
APÊNDICE G - Cálculo das Vazões das Fases em cada Estágio	147
APÊNDICE H - Tabelas dos Resultados Experimentais	151
APÊNDICE I - Programas Utilizados	170
NOMENCLATURA	182

CAPÍTULO - 1

INTRODUCCIÓN

1.- INTRODUÇÃO

Os processos de separação na indústria química são estudados como as suas "operações unitárias" e envolvem o estudo da separação de sistemas formados por sólido-sólido, sólido-líquido, sólido-gás, gás-gás, líquido-gás e líquido-líquido. Na separação de sistemas líquido-líquido o processo mais utilizado é a destilação e ela se realiza pela vaporização parcial da mistura líquida quando então se obtém um vapor mais rico no componente mais volátil. Na sua grande maioria é realizada em colunas de destilação. Nestas colunas de destilação se promove o contato entre as fases líquida e vapor e os meios normalmente empregados nas colunas para a efetivação deste contato são os recheios e os pratos.

As colunas que utilizam os pratos podem ser do tipo com ou sem vertedores, sendo que na seleção de um prato para um determinado uso se espera principalmente que ele seja de fácil construção, custo relativamente baixo, que permita uma maior produção com baixa perda de pressão, que se adapte a pequenas perturbações de operação e que também apresente uma boa eficiência de separação.

A grande maioria das colunas utiliza os pratos com vertedores pois foram eles os mais estudados. Porém são os pratos sem vertedores que apresentam a maioria dos aspectos

desejáveis para o projeto de um prato. Além disso, apresentam vantagens na operação com sistemas que podem provocar deposições e incrustações, pois a limpeza dos orifícios pode ser realizada de uma forma simples.

O principal impedimento para a utilização das colunas com pratos perfurados sem vertedores é a falta de dados publicados tanto sobre a hidrodinâmica como sobre a transferência de massa que permitam o projeto deste tipo de prato. Os estudos que tem sido realizados com eles, na sua grande maioria, utilizaram modelos hidráulicos e de um único prato onde se faz escoar em contra corrente um líquido com um gás inerte. Nestas condições não estão presentes a transferência de massa e calor, características da destilação, e que podem provocar alterações significativas nas propriedades físico-químicas e nas vazões das fases.

GIMENES (1986) estudou este tipo de prato e em condições destilantes e é com o objetivo de ampliar o conhecimento neste sentido que se desenvolve este trabalho, inclusive aumentando o valor da área livre de escoamento dos pratos até cerca de 40%.

Neste trabalho estudaremos aspectos do comportamento hidrodinâmico dos pratos perfurados sem vertedores operando com um sistema submetido a destilação e os itens a serem estudados são:

- a) Os regimes de escoamento e os tipos de dispersões líquido-vapor que se formam sobre os pratos.
- b) Os tipos de oscilações apresentados pela dispersão.
- c) A transição entre os dois regimes de maior interesse para a destilação que são o "froth" e o "spray".

d) A altura formada pela dispersão líquido-vapor.

e) O ponto de retenção de líquido sobre o prato, que representa o seu limite inferior de operação.

Estes estudos serão realizados em função das vazões e das propriedades físico-químicas das fases e dos parâmetros geométricos dos pratos.

CAPÍTULO - 2

ANÁLISE DA LITERATURA

2.1.- INTRODUÇÃO

As colunas de destilação são os equipamentos mais utilizados nas operações de separação de misturas de líquidos. Esta separação se consegue pela troca de massa e calor entre as fases líquido e vapor que circulam pela coluna. Para que esta separação seja eficiente, deve-se dar condições para que o contato entre as fases seja o melhor possível. Os meios mais comumente utilizados para promover este contato em colunas de destilação são os recheios e os pratos.

Em relação as colunas de pratos podemos dividi-las em dois grupos:

- Colunas de pratos com vertedores; que apresentam um fluxo cruzado das duas fases e possuem locais bem definidos para o fluxo de cada fase.

- Colunas de pratos sem vertedores; que apresentam um fluxo em contra-corrente das duas fases, as quais se utilizam dos mesmos locais (orifícios) para fluir pela coluna.

A figura 2.1 ilustra estes dois tipos de colunas.

O escoamento das fases em contra corrente nos pratos perfurados sem vertedores ocorre intermitentemente nos orifícios. O fluxo simultâneo das duas fases só é possível se a pressão hidrostática sobre os pratos variar. A drenagem do líquido do prato ocorre quando a pressão num local diretamente acima de um orifício atinge um valor maior do que o correspondente ao valor médio desta pressão .

A interação entre as fases líquida e vapor faz com que se forme sobre os pratos uma dispersão que pode variar tanto no seu comportamento hidrodinâmico como na sua altura.

A pesquisa em uma coluna de destilação pode ser dirigida tanto ao estudo da hidrodinâmica dos pratos como ao estudo das taxas de transferência de massa e calor na dispersão. Neste trabalho será estudada a hidrodinâmica dos pratos sendo analisados os regimes de escoamento, as oscilações das dispersões, a altura de dispersão que se forma, o ponto de retenção de líquido sobre o prato e a transição entre o regime que apresenta a fase líquida contínua e a fase gasosa dispersa na forma de bolhas ("froth") e o regime que apresenta a fase gasosa contínua e a fase líquida dispersa na forma de gotículas ("spray"), que sem dúvida afetam de uma forma direta as taxas de transferência de massa entre as duas fases.

2.2.- REGIMES DE ESCOAMENTO

A operação normal de uma coluna de destilação de pratos exige que sobre eles se forme uma dispersão líquido-vapor para permitir um contato efetivo entre as fases líquido e vapor que fluem pela coluna. Ao se variar as taxas de vazão das fases podem ocorrer alterações no tipo e no comportamento das dispersões formadas. A forma como a dispersão se apresenta e comporta irá influir na transferência de massa e desta forma torna-se importante uma análise dos regimes de escoamento de uma forma individual.

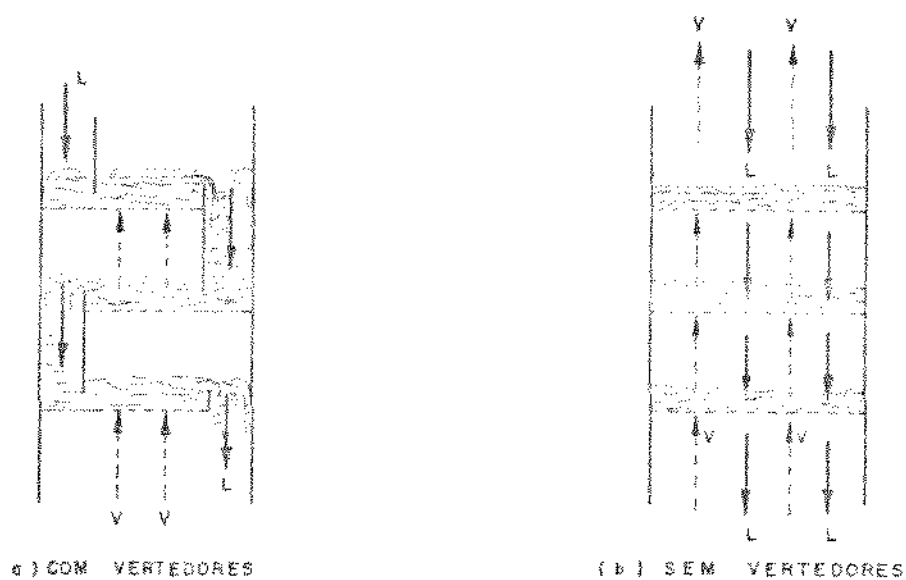


Figura 2.1.- Colunas de Pratos

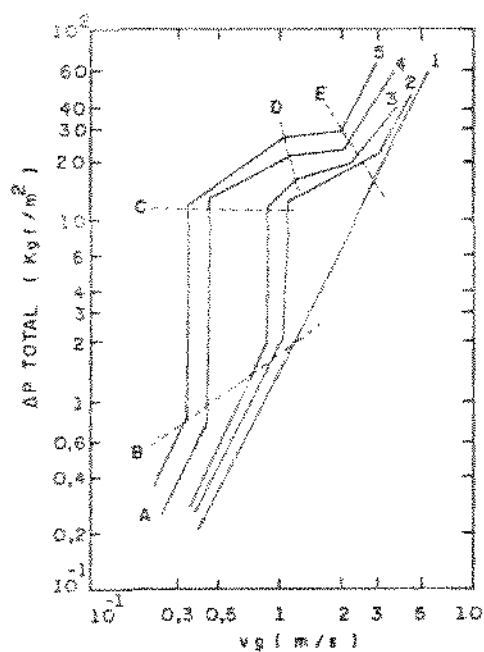


Figura 2.2.- ΔP total versus Velocidade Superficial do Gás
Taxas de Líquido ($\text{kg/m}^2\cdot\text{h}$)

- 1 - 0
- 2 - 1650
- 3 - 3580
- 4 - 11200
- 5 - 21100

[Zelinski e Kafarov (1961)]

ZELINSKI e KAFAROV (1961) descrevem a existência de quatro regimes diferentes e que são representados na figura 2.2. 1) Prato sem a presença de dispersão, onde o gás flue através de alguns orifícios enquanto o líquido flue pelos restantes. Representado pelo segmento AB que são linhas paralelas à do prato seco. 2) Regime de Borbulhamento: representado pelo segmento CD. Inicia-se no "Ponto de Sustentação" representado pelo ponto C. 3) Regime de Aeração ou Emulsificação: representado pelo segmento DE e que se inicia no "Ponto de Aeração" representado pelo ponto D. O Ponto de Aeração corresponde à velocidade do gás na qual todo o líquido do prato passa ao estado de uma espuma turbulenta. 4) Regime de Oscilações: representado pelo segmento EF e inicia-se pelo "Ponto de Oscilação" representado pelo ponto E. O Ponto de Oscilação representa o ponto onde as bolhas individuais começam a coalescer, formando correntes. Estas correntes provocariam as oscilações da dispersão.

RYLEK e STANDART (1964) com base na mesma figura 2.2 apresentada por ZELINSKI e KAFAROV (1961) procuram apresentar uma descrição mais precisa destes regimes. Eles descrevem então: 1) Prato sem a dispersão de líquido, representado pelos segmentos AB. 2) Regime de Borbulhamento: representado pelo segmento CD. O ponto onde se inicia este regime (ponto C) foi denominado "Ponto de Retenção" e é o limite entre os dois regimes anteriores. 3) Regime de Espuma Móvel: representado pelo segmento DE. Inicia-se com o "Ponto de Aeração" representado pelo ponto D. 4) Regime de Oscilações: representado pelo segmento EF e se inicia no "Ponto de Formação de Oscilações" representado pelo ponto E.

CERVENKA e KOLAR (1973) descrevem a existência de sete regimes diferentes: 1) Fluxo separado de líquido e gás através do prato; 2) Pulsações Uniformes; 3) Borbulhamento; 4) Espuma Homogênea; 5) Circulação; 6) Oscilações ou Ondas e 7) Fluidização (Spray). Os regimes estão representados na figura 2.6 e mostra a dependência da retenção de líquido com a velocidade do gás num determinado prato.

SHOUKRY et alii (1974) descrevem a existência de cinco regimes principais: 1) Borbulhamento; 2) Espuma Celular; 3) Froth Homogêneo; 4) Froth Circulante e 5) Oscilações. No regime de oscilações eles encontraram dois tipos e que denominaram de oscilações com diâmetro nodal e oscilações com círculo nodal.

CRUZ (1983) descreve a ocorrência de três regimes observados em seus experimentos: 1) Borbulhamento; 2) Espuma Celular e 3) Froth, sendo que neste regime observou também oscilações da dispersão e em alguns casos além da dispersão oscilar ela apresentava também um movimento rotacional. Estes movimentos oscilatórios são descritos no item 2.2.5.

Todos os pesquisadores anteriormente citados neste capítulo, utilizaram nos seus experimentos modelos hidráulicos onde a destilação e dessa forma a transferência de massa, não estão presentes. Nestes experimentos, um líquido puro ou uma mistura de líquidos era feita escoar em contra-corrente com um fluxo de gás representado pelo ar.

GIMENES (1986) realizou experimentos com uma coluna de pratos perfurados sem vertedores operando em condições destilantes e desta forma o fenômeno da transferência de massa entre as fases estava presente. Ele descreveu a ocorrência de cinco tipos principais de dispersões:

- Dispersões onde o vapor passa na forma de jatos arrastando o líquido e transformando-o em gotículas. Ocorreu somente com pouco líquido retido sobre o prato, próximo ao ponto de retenção de líquido.

- Dispersões sem formação de espuma que nas menores velocidades de gás se comportava como um borbulhamento e nas maiores como um "froth". Ocorria quando a fração molar do etanol era menor que 0.25.

- Dispersões semelhantes ao borbulhamento com formação de espuma.

- Dispersões bastante agitadas com formação de bolhas e correntes de bolhas, com grande quantidade de bolhas de vapor promovendo uma espuma do tipo celular.

- Dispersões com grande quantidade de bolhas, correntes de bolhas e jatos de gás transformando a parte superior da dispersão em "spray", isto é, um "froth" com uma interface superior em regime spray.

O que se observa é que não existe uma uniformidade nos termos empregados para descrever os vários regimes e que alguns subdividem um regime apresentado por outro pesquisador. Senão vejamos: o regime de borbulhamento descrito por ZELINSKI e KAFAROV (1961) e RYLEK e STANDART (1964) é subdividido em dois por SHOUKRY et alii (1974) que são o borbulhamento e a espuma celular. O regime de aeração descrito por ZELINSKI e KAFAROV (1961) ou o regime de espuma móvel descrito por RYLEK e STANDART (1964) são subdivididos em dois por CERVENKA e KOLAR (1973): espuma homogênea e circulação e por SHOUKRY et alii (1974): froth homogêneo e froth circulante.

Analisando as descrições feitas pelos pesquisadores anteriormente citados, encontramos tipos de regimes que poderiam ser agrupados como:

- Regime em que não existe a presença de dispersão sobre o prato, ou seja, ele está abaixo do ponto de retenção de líquido.

- Regime próximo ao ponto de retenção, caracterizado pela presença de jatos de vapor que transformam boa parte do líquido retido sobre o prato em gotículas. Ele se apresenta na forma de "spray" incipiente ou até mesmo como um regime "spray" bem caracterizado.

- Regime de borbulhamento: caracterizado pela livre ascensão das bolhas através do líquido, devido unicamente à força do empuxo.

- Regime de espuma celular: caracteriza-se por pequena turbulência, bolhas grandes, de forma poliédrica e separadas por um fino filme de líquido.

- Regime de "froth": caracterizado pela presença de correntes de bolhas separadas por uma quantidade de líquido maior que na espuma celular. As bolhas tem uma dimensão menor que no regime anterior. Apresenta também uma turbulência maior. Pode apresentar a dispersão com um movimento oscilatório e até rotacional sobre o prato (ver item 2.2.5) e também a presença de gotículas sobre a dispersão.

Destes regimes, o primeiro não tem utilidade na operação de colunas de pratos, pois a ausência de dispersão faz com que o contato entre as fases líquida e vapor praticamente inexista, refletindo isto numa taxa de transferência de massa muito baixa. Nesta situação aproxima-se do caso de uma coluna

de paredes molhadas. A região de operação das colunas de pratos perfurados sem vertedores é delimitada pelo ponto de retenção de líquido sobre os pratos e pelo ponto de inundação, quando o líquido não escoa mais pela coluna devido as elevadas forças de fricção com o gás ou porque o espaço entre os pratos fica totalmente preenchido com a dispersão. Desta forma, passaremos a fazer a seguir uma análise dos outros regimes relacionados acima, que são mais significativos na operação das colunas de pratos sem vertedores.

2.2.1.- REGIME DE BORBULHAMENTO

Este regime na descrição de ZELINSKI e KAFAROV (1961), RYLEK e STANDART (1964) e CERVENKA e KOLAR (1973) inicia-se no ponto de retenção de líquido sobre o prato, quando ocorre uma brusca elevação na queda de pressão do gás, representado pelo segmento BC na figura 2.2. O regime de borbulhamento está representado pelo segmento CD da mesma figura. Nesta região verifica-se que o aumento da velocidade do gás é acompanhado por um aumento na queda de pressão. Nas figuras 2.4 e 2.5, este regime está representado pelos primeiros segmentos das curvas. Observa-se que o aumento da velocidade do gás é acompanhado por um aumento na quantidade de líquido retido sobre o prato. Deve-se salientar que as curvas das figuras 2.2 à 2.5 são todas para vazões de líquido constante.

Segundo estes autores, no regime de borbulhamento o gás passa por uma camada relativamente espessa de líquido, na forma de bolhas individuais. Este regime é caracterizado pelo

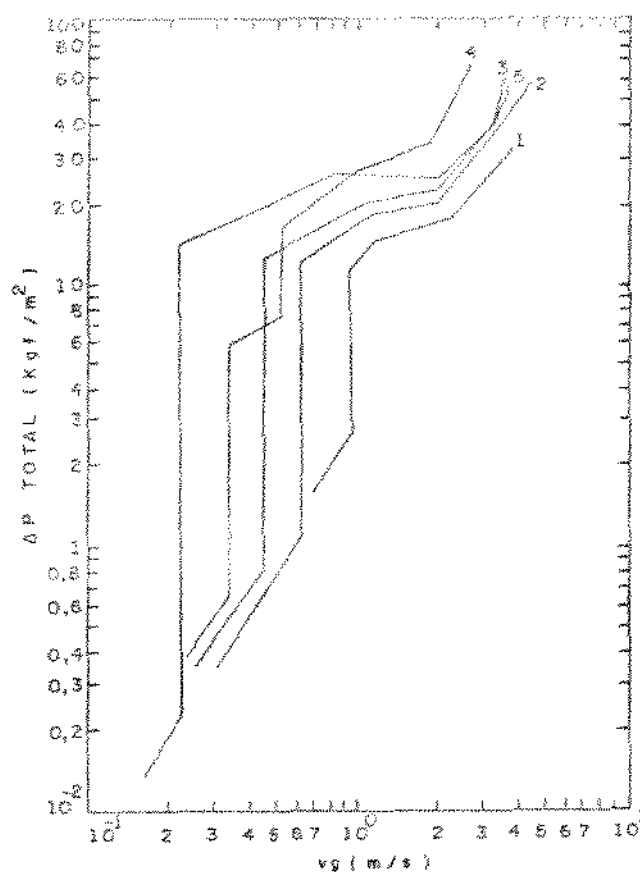


Figura 2.3.- ΔP total versus Velocidade Superficial do Gás para diversas Áreas Livres

Vazão do Líquido = $8060 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$

Área Livre dos Pratos (%)

1 - 24,7

2 - 20,7

3 - 18,1

4 - 16,2

5 - 18,3

[Zelinski e Kafarov (1961)]

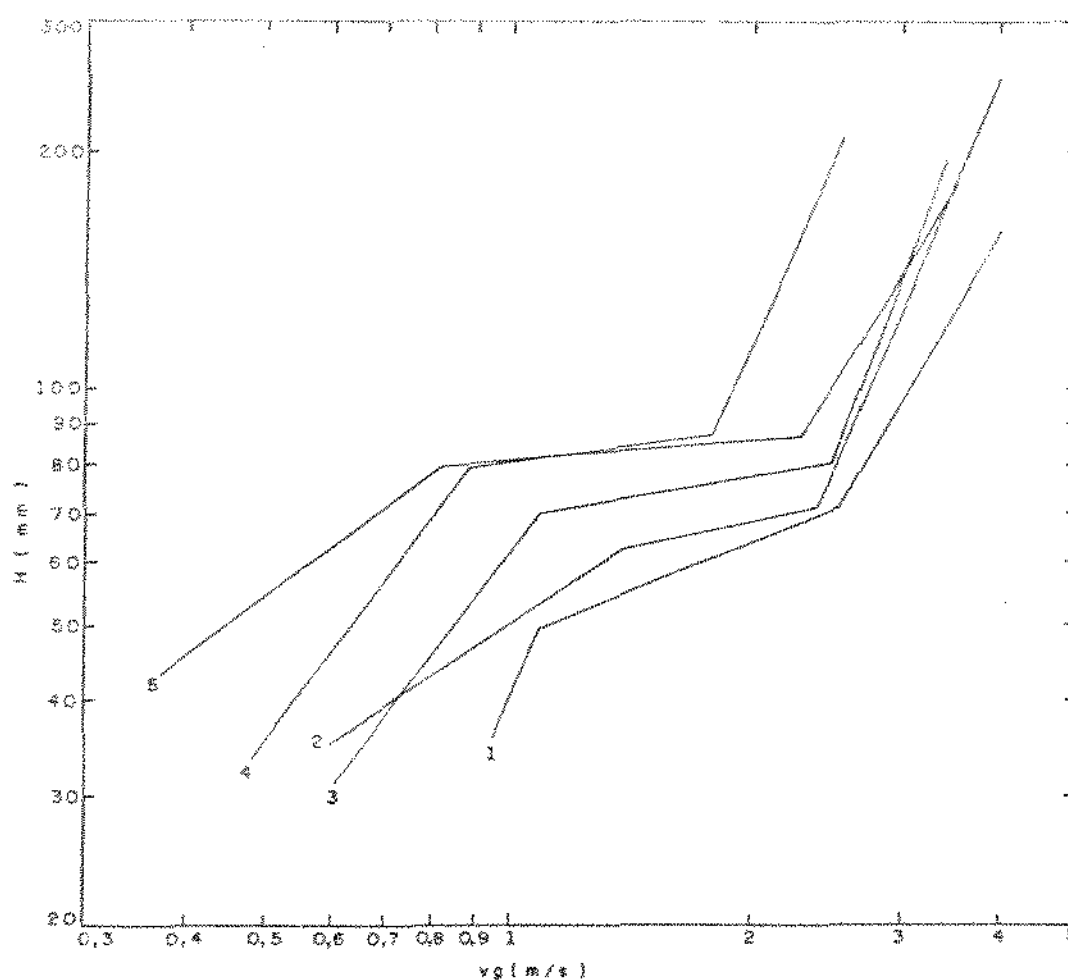


Figura 2.4.- Altura da Dispersão versus Velocidade Superficial do Gás para diversas Áreas Livres
 Vazão do Líquido = 8060 kg/m².h
 Área Livre dos Pratos (%)

- 1 - 24,7
- 2 - 20,7
- 3 - 18,1
- 4 - 16,2
- 5 - 18,3

[Zelinski e Kafarov (1961)]

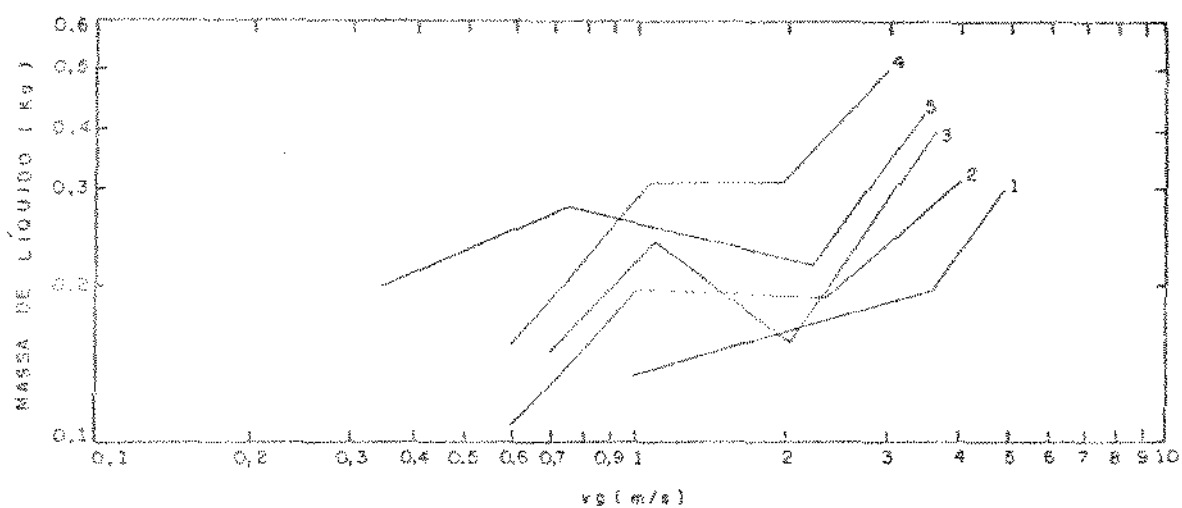


Figura 2.5.- Massa de Líquido versus Velocidade Superficial do Gás para Pratos com Diferentes Áreas Livres.

Vazão do Líquido: 8060 kg/m².h

Área Livre (%): 1 - 24,7 4 - 16,2
2 - 20,7 5 - 18,3
3 - 18,1

[Zelinski e Kafarov (1961)]

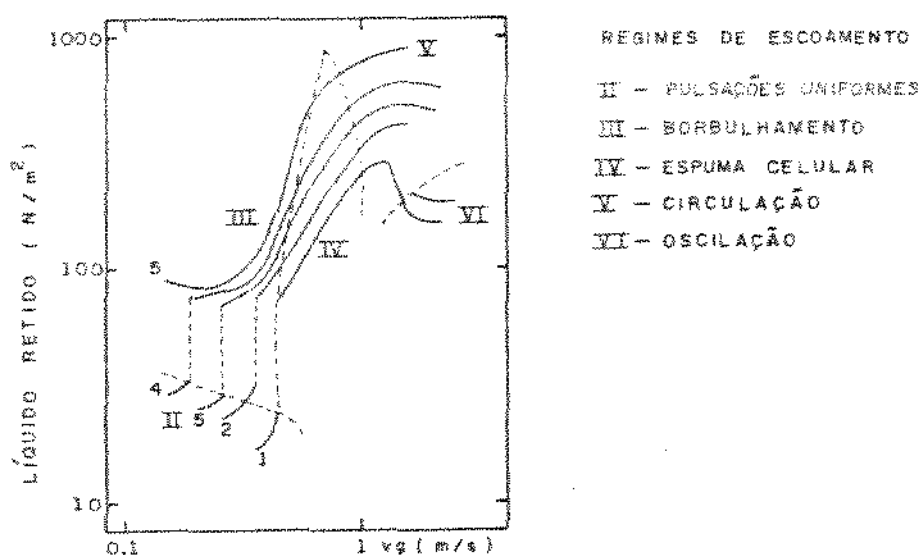


Figura 2.6.- Líquido Retido no Prato versus Velocidade Superficial do Gás.

Vazões de Líquido (kg/m².h)

1 - 0,4 4 - 2,0
2 - 0,7 5 - 4,0
3 - 1,2

[Cervenka e Kolar (1973)]

fato de que acima da camada de líquido, por onde as bolhas de gás passam, existe uma camada de espuma. Com o aumento gradual da velocidade do gás, a camada inferior de líquido contendo as bolhas decresce, enquanto a camada superior de espuma aumenta. Esta transição da camada de líquido para a camada de espuma é explicada da seguinte forma: a existência de camada de líquido, onde as bolhas passam por flutuação livre sem acumulação de gás no líquido, só é possível sob certas condições, isto é, quando a velocidade superficial do gás (v_g) é menor que $v_b * \epsilon$, onde ϵ é a porosidade da dispersão e v_b é a velocidade de ascensão das bolhas. Quando $v_g > v_b * \epsilon$, a livre flutuação das bolhas não consegue dar passagem a todo o gás através do aparelho e desta forma tem início uma acumulação de bolhas de gás na camada de líquido, o que causa a formação de espuma. Estes mesmos autores consideram o regime de borbulhamento completo, quando todo o líquido no prato muda para o estado de uma espuma turbulenta.

SHOUKRY et alii (1974) e THOROGOOD (1963) consideram o regime de borbulhamento como sendo apenas a passagem de bolhas pela camada de líquido sem a formação de espuma. Quando ocorre a presença de espuma sobre a camada de líquido eles já o classificam como outro regime. CALDERBANK E RENNIE (1962) e THOROGOOD (1963) afirmam que nesta região, a retenção de gás aumenta com o aumento da velocidade do próprio gás. Este aumento da retenção de gás está limitado ao valor da porosidade igual a 0.6, condição que se aproxima a de um empacotamento de esferas.

2.2.2.- REGIME DE ESPUMA CELULAR

Ào se alcançar o limite de $\epsilon = 0.6$ conforme descrito por THOROGOOD (1963), um pequeno aumento na velocidade do gás poderá fazer com que as bolhas se deformem em poliedros, originando a espuma celular. Nesta espuma as bolhas são separadas por um fino filme de líquido. A figura 2.7 ilustra esta situação.

RENNIE e EVANS (1962) encontraram que a formação da espuma celular é favorecida por:

- pratos com uma distribuição homogênea de furos, em geral triangular, e de pequeno espaçamento
- pequenos diâmetros dos orifícios
- baixas vazões de líquido
- baixos Números de Reynolds de gás nos orifícios.

Este tipo de regime tem uma importância maior na lavagem de gases e na umidificação do que na destilação, pois a transferência de massa neste regime é baixa. Ele então se aplica melhor naqueles processos onde se deseja o contato de uma grande quantidade de gás com pequenas quantidades de líquido e pequenas perdas de carga.

2.2.3.- REGIME "FROTH"

A transformação de uma dispersão do tipo espuma celular na do tipo "froth" pode-se dar da seguinte forma, segundo RYLEK e STANDART (1964): com o aumento da velocidade do gás, as bolhas se rompem em bolhas menores, ocorrem colisões maci-

ças das bolhas entre si e começam a se formar correntes de gás. A velocidade de ascensão dos gases neste regime é cerca de dez vezes maior que a da livre flutuação das bolhas (v_b). As bolhas neste regime podem coalescer e se romper novamente, de forma dinâmica. O líquido pode expandir em meclanas, juntar-se em gotas ou camadas. Isto provoca a constante quebra e restauração da interface líquido-vapor. Em resumo, a turbulência deste regime é bastante elevada e isto faz com que as taxas de transferência de calor e massa sejam mais elevadas, quando comparadas ao regime de borbulhamento e de espuma colunar. Na figura 2.2, este regime está representado pelo segmento DE. Nas figuras 2.4 e 2.5 pelos segmentos intermediários dos gráficos. Pode-se observar destas figuras que a perda de pressão e a altura da dispersão aumentam apenas levemente com o aumento da velocidade do gás. A altura da dispersão pode até mesmo diminuir em alguns casos. A figura 2.8 ilustra o aspecto geral desta dispersão.

O regime de oscilações que é descrito por ZELINSKI e KAFAROV (1961), RYLEK e STANDART (1964), CERVENKA e KOLAR (1973) e SHOUKRY et alii (1974), pode ser incluído neste regime "froth" quanto ao aspecto da dispersão. O que distingue este regime de oscilações do regime "froth" como é descrito acima, é que além das características do regime "froth", a dispersão apresenta oscilações conforme será descrito no item 2.2.5.

RYLEK e STANDART (1964) comentam que a dispersão do tipo "froth" é a mais comum nos sistemas de duas fases e que ocorre numa faixa relativamente grande de velocidades do gás.

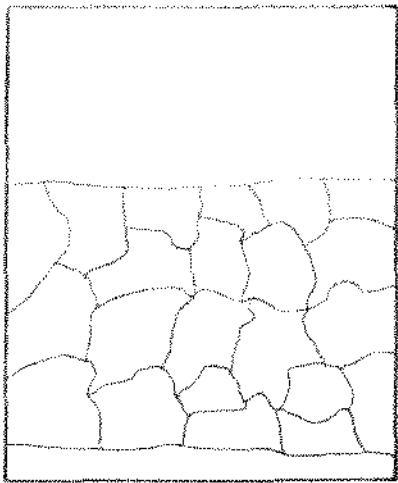


Figura 2.7.- Regime de Espuma Celular

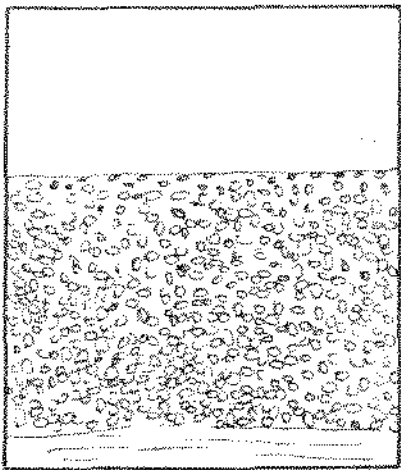


Figura 2.8.- Regime "Froth"

Nos regimes descritos nos itens 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3 a fase contínua na dispersão é a fase líquida, enquanto que a fase dispersa é o gás, que se encontra na forma de bolhas. Existe porém no regime "froth" um limite superior para a velocidade do gás em que esta situação se inverte e passamos a ter então uma dispersão em que a fase contínua passa a ser a do vapor enquanto que a fase dispersa passa a ser o líquido, que se apresenta na forma de gotículas. Este é o regime "spray". PINCZENSKI e FELL (1972) afirmam que uma das diferenças entre o regime "froth" e o "spray" é que o regime "froth" está associado com um borbulhamento no orifício, enquanto que no regime "spray" o gás passa na forma de jatos através do orifício.

2.2.4.- REGIME "SPRAY"

A ocorrência deste regime em pratos perfurados sem vertedores praticamente não tem registros na literatura já publicada.

RYLEK e STANDART (1964) comentam que para uma vazão de líquido constante, quando a velocidade do gás se aproxima do limite superior da fase de espuma móvel, ponto E da figura 2.2, começa a predominar a fase de gotículas.

VALENTIN (1967) afirma que em razão da elevada velocidade do gás e a turbulência das fases líquida e vapor, este regime apresenta elevados coeficientes locais de transferência de massa. Porém, como a sua área interfacial total é muito baixa, a contribuição do "spray" para a transferência de massa é muito menor que a do "froth". Afirma também que a quantidade

de "spray" aumenta com o aumento da velocidade do gás e com o decréscimo da do líquido.

CERVENKA e KOLAR (1973) apresentam alguns dados experimentais obtidos em seus experimentos com pratos sem vertedor. O sistema utilizado foi o água-ar. Constatase que em todos eles, este regime apareceu em baixas vazões de líquido e velocidades mais altas do gás. De um total de 16 pratos investigados, o regime "spray" ocorreu em apenas dois.

No estudo das colunas de pratos com vertedores, este regime já está sendo investigado por vários autores, tais como PINCZEWSKI e FELL (1974) e (1977), PORTER et alii (1977) e RAPER et alii (1984). Porém como o equipamento utilizado é diferente, não serão aqui comentados.

A formação da dispersão do tipo "spray" pode ser descrita da seguinte forma segundo PINCZEWSKI e FELL (1974): conforme a ilustração da figura 2.9, na região inferior a dispersão apresenta filmes de líquido que envolvem os jatos de gás provenientes dos orifícios. Estes filmes tem um formato cônico. O filme de líquido é fragmentado posteriormente em gotículas pela influência da elevada velocidade dos jatos de vapor. As gotículas que se formam adquirem uma velocidade e esta é responsável pela sua trajetória no espaço livre entre os pratos. A região inferior, denominada zona de formação de gotículas, compreende a região entre a superfície do prato até o ponto onde as gotículas começam a ocorrer. A região superior, denominada zona de propagação de gotículas, corresponde a região onde o efeito dos jatos de gás já não é significante e as gotículas percorrem uma trajetória normal.

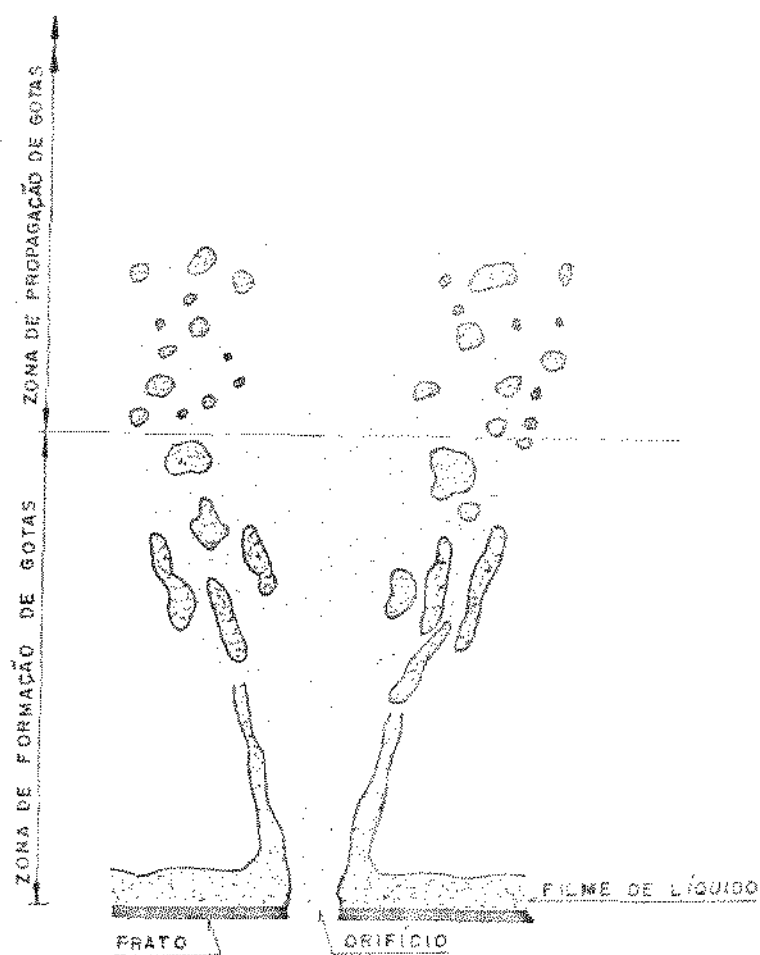


Figura 2.9.- Formação do "Spray"

[Pinczewski e Fell (1974)]

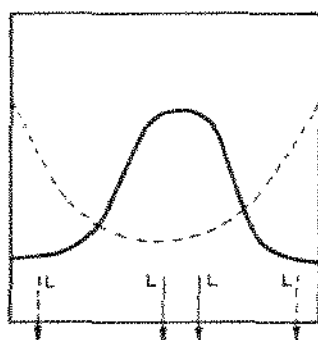


Figura 2.10
Oscilação de Onda Completa

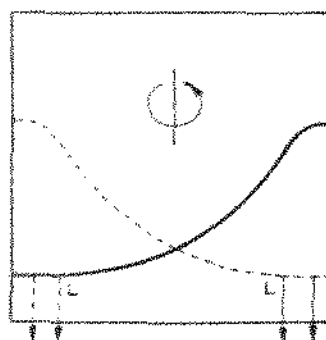


Figura 2.11
Oscilação de Meia Onda

2.2.5.- OSCILAÇÕES DA DISPERSÃO

O regime de oscilações descrito por ZELINSKI e KAFAROV (1961), RYLEK e STANDART (1964), CERVENKA e KOLAR (1973) e SHOUKRY et alii (1974) e que também apresenta a dispersão do tipo "froth" conforme descrito no item 2.2.3, tem como característica o fato da dispersão não apresentar no seu topo um nível regular, e sim um movimento oscilatório que faz com que a altura da dispersão sobre o prato seja diferente num mesmo ponto em função do tempo. Na figura 2.2 esta região está representada pelo segmento EF e nas figuras 2.4 e 2.5 pelos últimos segmentos dos gráficos. Pode-se observar que neste regime de "froth" oscilante, a perda de pressão e a retenção de líquido no prato passam a aumentar mais rapidamente do que no "froth" sem oscilações.

BIDDULPH e STEPHENS (1974) e SHOUKRY et alii (1974) trabalhando com o sistema água-ar em colunas de pratos perfurados com vertedor, CERVENKA e KOLAR (1973) utilizando o sistema água-ar e CRUZ (1983) trabalhando também com o sistema água-ar e o sistema solução aquosa de etanol-ar, porém em pratos perfurados sem vertedores, descrevem a ocorrência de dois tipos de oscilações e que foram definidos por BIDDULPH e STEPHENS (1974) como oscilação de meia onda e oscilação de onda completa.

GIMENES (1986) trabalhando com o sistema etanol-água operando em condições destilantes, numa coluna de pratos perfurados sem vertedores, observou apenas a ocorrência da oscilação de meia onda.

A oscilação de onda completa, na descrição de BIDDULPH e STEPHENS (1974) comporta-se da seguinte forma: a dispersão move-se simultaneamente das paredes para reunir-se no centro do prato. Neste momento, a altura da dispersão no centro do prato é maior do que nas paredes. Em seguida o movimento se inverte e a dispersão move-se no sentido das paredes e então a altura da dispersão próxima as paredes torna-se maior do que no centro do prato. Quando a dispersão atinge o pico, tanto no centro do prato como próximo as paredes, produz-se um "spray" que é arremessado para cima fazendo com que aumente o arraste. A ocorrência deste tipo de oscilação tem uma velocidade bem definida e se esta é ultrapassada a oscilação torna-se mais confusa, com picos movendo-se através do prato. A figura 2.10 ilustra o movimento da dispersão neste tipo de oscilação.

A oscilação de meia onda, ainda segundo BIDDULPH e STEPHENS (1974), comporta-se assim: a dispersão oscila de um lado a outro do prato de forma que se a altura da dispersão estiver mais alta num ponto próximo a parede da coluna, o lado oposto estará no mesmo instante com uma altura de dispersão menor. A figura 2.11 ilustra o movimento da dispersão neste tipo de oscilação.

Os diversos autores citados anteriormente comentam que a oscilação de onda completa ocorre em velocidades inferiores à da oscilação de meia onda.

Segundo BIDDULPH e STEPHENS (1974) as oscilações de onda completa ocorrem quando o comprimento de onda torna-se igual ao diâmetro da coluna e as oscilações de meia onda ocorrem quando o comprimento da onda torna-se igual ao dobro do diâmetro da coluna.

SHOUKRY et alii (1974) e CRUZ (1983) descrevem ainda a ocorrência de um movimento rotacional da dispersão e que acompanha a oscilação de meia onda. CRUZ (1983) explica este movimento rotacional pela geometria da coluna que é circular. As colisões sucessivas da dispersão com as paredes da coluna e em pontos diferentes, na oscilação de meia onda, promovem a estabilização do movimento rotacional da dispersão.

A drenagem do líquido presente no prato, segundo SHOUKRY et alii (1974) ocorre sempre nas regiões dos pratos onde a altura da dispersão é maior, conforme está ilustrado nas figuras 2.10 e 2.11.

Para prever o início das oscilações, são apresentadas equações na literatura e que são citadas a seguir: BIDDULPH e STEPHENS (1974) propõem o seguinte grupo adimensional:

$$B_s = \frac{v_g \cdot v_t \cdot H \cdot \rho_g}{g \cdot D_c^3 \cdot \rho_l \cdot \alpha} \quad (2.1)$$

onde as unidades das variáveis são as do sistema MKS. Através de dados experimentais determinaram que quando $B_s = 0,5 \cdot 10^{-5}$, inicia-se a oscilação de onda completa e ela continua até que, com o aumento da velocidade do gás o valor de B_s passe para $2,5 \cdot 10^{-5}$. Neste ponto inicia-se a oscilação de meia onda.

CRUZ (1983) propõe a seguinte equação para prever o início da oscilação de meia onda com movimento rotacional:

$$v_g = 1,2 \cdot \sqrt{g \cdot D_c} \cdot \left[\frac{L_s}{C_s} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \right]^{-0,34} \cdot (\Phi)^{0,25} \quad (2.2)$$

onde as unidades das variáveis são as do sistema MKS.

A equação (2.2) apresenta como inovação em relação ao grupo adimensional proposto por BIDDULPH e STEPHENS (1974), a presença da área livre de escoamento do prato. GIMENES (1986) trabalhando com o sistema etanol-água em condições destilantes encontrou que seus dados se ajustaram muito bem a equação (2.2) na previsão do início das oscilações de meia onda.

Existem controvérsias na literatura em relação a vantagem ou não na utilização de pratos operando nas condições em que ocorrem as oscilações. Por exemplo, RYLEK e STANDART (1964) descrevem que a forte mistura e turbulência da dispersão nesta fase é muito favorável a transferência de calor e massa. Já BIDDULPH e STEPHENS (1974) utilizando pratos com vertedores comentam que os dois tipos de oscilações são indesejáveis, sendo que o tipo de meia onda é o mais violento. Afirmam que provocam a redução da capacidade e a inundação prematura da coluna, além do arraste que aumenta muito com estas oscilações.

As informações acima indicam que o estudo destes regimes de escoamento é importante pois influem no desempenho das colunas de destilação. Desta forma, neste trabalho serão estudados estes regimes, sua ocorrência e comportamento, em função das variações geométricas dos pratos e das variações nas vazões de líquido e vapor que serão utilizadas.

2.3.- TRANSIÇÃO "FROTH-SPRAY"

A importância do estudo da transição entre estes dois regimes de escoamento explica-se pela radical diferença na estrutura da dispersão entre os dois regimes. Como já foi comentado anteriormente, enquanto o regime "froth" apresenta o líquido como a fase contínua e o vapor como a fase dispersa na forma de bolhas, o regime "spray" apresenta o vapor como a fase contínua e o líquido como a fase dispersa na forma de gotículas. A passagem do vapor através dos orifícios do prato também é diferente nos dois regimes: no regime "froth" a passagem se dá por borbulhamento enquanto que no regime "spray" a passagem ocorre na forma de jatos de gás. Estas diferenças fazem com que a hidrodinâmica dos pratos seja diferente e deverá influenciar significativamente nas taxas de transferência de massa e calor.

Não se encontrou na literatura nenhuma referência sobre o estudo desta transição em pratos perfurados sem vertedores. Existem diversas publicações [PINCZEWSKI e FELL (1972), PAYNE e PRINCE (1977), HOFHUIS e ZUIDERWEG (1979), PRINCE et alii (1979), WONG e KWAN (1979), LOCKETT (1981), MIYAHADA e TAKAHASHI (1984)] que estudaram este fenômeno em pratos perfurados com vertedores e que são apresentados a seguir.

PINCZEWSKI e FELL (1972) utilizaram a seguinte equação em seus experimentos:

$$h_t = K \cdot d^{1/5} \cdot (P_1 - P_g)^{0.5} \cdot v_{go} / \rho_1^{0.5} \quad (2.3)$$

onde as variáveis h_t , d , f_j estão no sistema CGS enquanto as demais, com exceção do K que é adimensional, estão no sistema MKS.

No intervalo de $d = 0,625 - 1,905$ cm e $\phi = 5,9 - 16,1\%$ encontraram $K = 0,0067$.

A equação (2.3) apesar de levar em conta o diâmetro do orifício não utiliza o valor da área livre de escoamento. Eles utilizaram em seus experimentos o sistema água-ar.

PAYNE e PRINCE (1977) e PRINCE et alii (1979) utilizaram a seguinte equação:

$$H/d = 1,5 \cdot (Fr^*) \quad (2.4)$$

$$h_t = 1,5 \cdot \epsilon \cdot (Fr^*) \quad (2.5)$$

$$Fr^* = \left[\frac{\rho_a}{\epsilon \cdot \rho_l} \cdot \frac{v_{ao}}{g \cdot d} \right]^{0,5} \quad (2.6)$$

onde as unidades das variáveis destas três equações são as do sistema MKS.

PRINCE et alii (1979) utilizaram os sistemas água-ácido acético e água-etanol em condições destilantes enquanto PAYNE e PRINCE (1977) utilizaram o sistema água-ar.

Nestas duas referências utilizaram-se dois diâmetros de orifício: 0,48 e 0,64 cm e dois valores de área livre: 4 e

9% o que não recomenda a sua utilização nas previsões do comportamento em valores superiores de área livre.

HOFHUIS e ZUIDERWEG (1979) propõem uma equação similar à equação (2.5):

$$\frac{h_t}{d} = \frac{1,1}{\phi} \cdot \frac{v_g}{\sqrt{g \cdot h_t}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (2.7)$$

onde as unidades das variáveis estão no sistema MKS.

Utilizaram quatro sistemas diferentes porém sem a presença da destilação.

Em relação as equações (2.4) e (2.5) a equação (2.7) utiliza a área livre de escoamento dos pratos e a velocidade superficial do vapor ao invés da velocidade no orifício. Com esta equação obtiveram um ajuste razoável dos dados obtidos por PINCZEWSKI e FELL (1972), PAYNE e PRINCE (1977) e PORTER e WONG (1969). Neste caso ainda, as áreas livres abrangidas são as mesmas citadas acima e que estão numa faixa bastante pequena.

WONG e KWAN (1979) propõem a seguinte equação:

$$\frac{Z_t}{d \cdot g} = 2,06 + 30,5 \cdot \frac{v_g}{\phi} \cdot \left[\frac{\rho_g}{g \cdot (\rho_l - \rho_g)} \right]^{0,5} \quad (2.8)$$

onde: Z_t = retenção de líquido por unidade de área na transição (mm)

d = diâmetro do orifício (mm)

$\bar{x}$ = densidade relativa do "froth"

v_g = velocidade superficial do vapor (m/s)

ρ_l e ρ_g = massas específicas do líquido e do gás (kg/m³)

g = aceleração gravitacional (m/s²)

Segundo os autores, esta equação é válida para áreas livres e densidades das fases diferentes daquelas do trabalho. Porém a faixa abrangida pela correlação ainda é bastante pequena: área livre de 3,20 a 9,40%. Os autores ainda compararam as equações (2.4) e (2.5) obtidas com diâmetros de orifício de 0,48 e 0,64 cm com a equação (2.8) e determinaram que os resultados com $d = 0,48$ e $0,64$ não diferiam muito quando comparados aos resultados com $d = 0,32$ e $1,27$ cm, onde as diferenças, utilizando as equações (2.4) e (2.5), foram da ordem de 300% superiores aos resultados da equação (2.8). A equação (2.8) correlacionou bem todos os resultados.

LOCKETT (1981) propõe a seguinte correlação:

$$\frac{h_t}{d} = 2,78 \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,5} \cdot v_{go} \quad (2.9)$$

onde as unidades das variáveis estão todas no sistema MKS.

A equação (2.9) foi obtida aplicando uma regressão linear aos dados dos pesquisadores citados anteriormente e de

outros dois trabalhos publicados. A faixa de área livre abrangida é de 3,2 - 16,1%. A constante 2,78 tem a dimensão (s/m).

MIYAHARA e TAKAHASHI (1984) propõem as equações:

$$\frac{h_t}{d} = (Fr^*)^{0,65} \quad \text{para } Bo > 4 \quad (2.10)$$

$$\frac{h_t}{d} = 0,2 \cdot (Fr^*)^{1,23} \cdot (Bo)^{0,8} \quad \text{para } 1,5 < Bo < 4 \\ 1,5 < Fr^* < 10 \quad (2.11)$$

Todas as unidades estão no sistema MKS.

Os autores comentam que a equação (2.9) é falha por não levar em consideração a dependência da transição com as propriedades físicas do líquido.

As equações (2.10) e (2.11) foram obtidas de dados experimentais dos autores com modelos hidráulicos e de dados disponíveis na literatura, envolvendo dados de modelos hidráulicos e sistemas líquidos binários submetidos a destilação.

Apesar das equações propostas por LOCKETT (1981) e MIYAHADA e TAKAHASHI (1984) correlacionarem dados obtidos tanto em modelos hidráulicos como em sistemas submetidos a destilação e também em valores diferentes de área livre, deve-se salientar mais uma vez que eles foram todos obtidos em pratos perfurados com vertedores e numa faixa limitada de área livre quando comparada à faixa que este trabalho se propõe a estudar. Assim, procuraremos observar se esta transição irá ocorrer no desenvolvimento do trabalho experimental, pois será de grande valia no estudo dos pratos perfurados sem vertedores.

2.4.- ALTURA DA DISPERSÃO

Na descrição dos regimes de escoamento feita anteriormente observa-se que a interação entre as correntes do vapor e do líquido provoca a formação de uma dispersão bifásica e que o comportamento desta dispersão varia se as vazões do vapor e/ou do líquido também são alterados. A altura que esta dispersão pode alcançar, segundo THOROGOOD (1963) e RYLEK e STANDART (1964), depende das velocidades do vapor e do líquido, da geometria do prato e das propriedades físico-químicas das fases.

No projeto das colunas de destilação, o conhecimento da altura da dispersão que se forma sobre os pratos é importante por dois motivos:

a) a eficiência de separação do prato depende entre outros fatores do tempo de contato entre as fases. Quanto maior for a altura da dispersão que se forma, maior será esse tempo de contato e a transferência de massa e calor são favorecidas;

b) para se definir o espaçamento dos pratos é necessário conhecer a altura da dispersão. O espaçamento entre os pratos, segundo RYLEK e STANDART (1964), é definido pela seguinte equação:

$$R = H + M \quad (2.12)$$

O valor recomendado de M para os pratos sem vertedores é de 8 a 10 cm, para impedir que o espaço entre os pratos seja preenchido com a dispersão e minimizar o arraste de líquido.

RYLEK e STANDART (1964) apresentam os estudos feitos por Kasatkin e colaboradores, que relacionaram a altura da dispersão como uma função da velocidade do vapor no orifício, para uma vazão e propriedades físicas do líquido constantes. Isto está representado na figura 2.12. Em valores suficientemente baixos de v_{g0} forma-se uma espuma de boas propriedades e a sua altura aumenta com o quadrado da velocidade do vapor. Isto está representado pela linha 1-A na figura 2.12 e pelo segmento CD na figura 2.2. Com o aumento de v_{g0} até algum dos pontos A_1 , A_2 , ou A_3 , cuja localização é determinada pelo fluxo mássico do líquido e pelo diâmetro equivalente dos orifícios, a estrutura da espuma começa a mudar. Neste ponto, o aumento de v_{g0} não provoca mais a elevação da altura da dispersão com v_{g0}^2 mas sim um aumento muito pequeno com v_{g0} . Isto está representado pelos segmentos AB na figura 2.12 e pelos segmentos DE na figura 2.2. A energia da corrente gasosa é absorvida principalmente pela mudança na estrutura da dispersão. Nos pontos B_1 , B_2 e B_3 toda a dispersão muda para um sistema sem estrutura, formado por gotículas, membranas de líquido e com correntes de gás. A partir deste ponto a altura volta a crescer com o quadrado de v_{g0} .

Os autores salientam que pratos com um diâmetro equivalente e áreas livres de escoamento mais elevadas podem não apresentar estas relações. Neste caso, já em baixos valores de v_{g0} atinge-se diretamente a linha 2 na figura 2.12, representado pela linha pontilhada nesta figura.

Para o cálculo da altura da dispersão são apresentadas as seguintes equações:

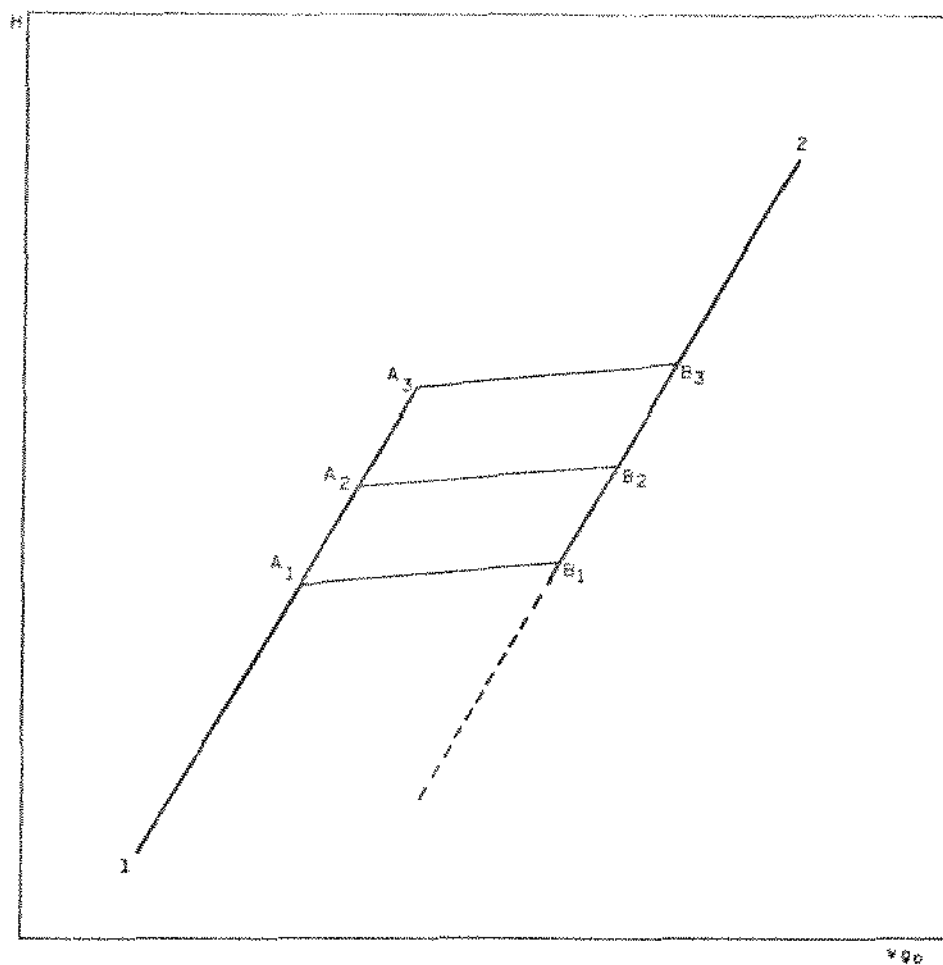


Figura 2.12.- Altura da Dispersão como função logarítmica da Velocidade do Gás no Orifício

[Rylek e Standart (1964)]

$$Fr \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot C = 3,25 \cdot 10^{-3} \quad (2.13)$$

para $B \leq 2,95$

$$Fr \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot C = 1,10 \cdot 10^{-3} \cdot B \quad (2.14)$$

para $2,95 \leq B \leq 10$; $\phi \leq 15\%$; $d_e \leq 6 \text{ mm}$.

$$Fr \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot C = 1,1 \cdot 10^{-3} \quad (2.15)$$

para $B \geq 10$; $\phi \geq 30\%$; $6 \text{ mm} \leq d_e \leq 12 \text{ mm}$

$$\text{onde: } Fr = \frac{v_{qo}^2}{g \cdot H} \quad C = \left(\frac{(Q_1) \cdot \mu_1 \cdot \rho_l}{g \cdot r_1^3} \right)^{0,067}$$

B = índice do comportamento hidrodinâmico em um prato sem vertedor.

Ainda segundo RYLEK e STANDART (1964), Molokanov e colaboradores determinaram que o coeficiente B varia com o diâmetro da coluna e apresentaram a seguinte equação para o cálculo de B :

$$B = B_+ \cdot \exp \left(\alpha \cdot \frac{D_c - D_o}{D_o} \right) \tag{2.16}$$

onde: $B_+ = 10$; $\alpha = 0,465$; $D_o = 400$ mm e D_c é o diâmetro da coluna (mm) e deve ser maior que 150 mm.

A tabela 2.1 a seguir, apresenta a comparação entre os valores calculados e experimentais encontrados para a constante B.

Diâmetro da coluna (mm)	150	400	570	1120	1340
Coefic. B (eq. 2.16)	0	10	12,2	23,1	29,8
Coefic. B (experimen.)	4-5	10	11,7	22	31,3

TABELA 2.1.- Valores do Coefic. B em função do diâmetro da coluna

Segundo RYLEK e STANDART (1964), os resultados experimentais de Kasatkin e colaboradores ajustaram-se às equações (2.13), (2.14) e (2.15) da seguinte forma: 75% deles apresentaram uma precisão média de 30%. Os restantes 25% apresentaram um erro maior que 30%.

As equações (2.13), (2.14) e (2.15) utilizam nos cálculos a velocidade do gás no orifício. A determinação desta velocidade não é simples, pois além do fato do escoamento não se dar sempre nos mesmos orifícios e sim de forma aleatória através deles, ocorre também que o gás escoar através de uma fração do número total de orifícios e a outra fração é ocupada

pelo líquido. Esta fração ocupada pelo líquido varia com as vazões e com as propriedades físicas das fases líquida e vapor. Estes fatores juntamente com o fato da constante B variar com o diâmetro da coluna dificulta a utilização deste conjunto de equações na predição da altura das dispersões sobre os pratos.

RYLEK e STANDART (1964) apresentam uma outra equação, sugerida por Pozin e colaboradores, para o cálculo da altura da dispersão:

$$H = C.v_g^{n+d_1} \quad (2.17)$$

onde C e d_1 são coeficientes que precisam ser determinados experimentalmente e n varia entre 0,5 e 1,5. Esta equação utiliza a velocidade superficial do gás, que é de determinação mais simples. Porém, não é citada a faixa de validade da equação e qual o tipo de prato que foi empregado.

Na literatura encontram-se também equações que no cálculo da altura da dispersão, levam em conta a estrutura formada pela dispersão líquido-vapor no que se refere as proporções volumétricas com que cada uma participa da dispersão. Assim, é introduzida na equação a quantidade de líquido retida no prato. Esta retenção de líquido no prato (h) pode ser relacionada com a altura total da dispersão (H) para se obter a porosidade. A porosidade da dispersão é definida como a razão entre o volume ocupado pela fase vapor e o volume total ocupado pela dispersão. De forma simplificada ela pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\epsilon = \frac{H - h}{H} \quad (2.18)$$

Conclui-se que se dispusermos de dados da quantidade de líquido retido e da porosidade podemos calcular a altura da dispersão através da equação (2.18).

MAHENDRU e HACKL (1979) apresentam as seguintes equações para o cálculo da altura de líquido retido e da porosidade em pratos perfurados sem vertedores:

$$h = 0,065 \cdot \frac{(L^+)n \cdot [v_g \cdot \sqrt{(p_g/p_{ar})}]^{0,75}}{p_l \cdot (\phi)^{0,5} \cdot (T/d)^{0,42}} \quad (2.19)$$

onde: $n = 0,3162 \cdot (\phi)^{-1/4}$.

h em m, L^+ em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$, v_g em m/s , p_g e p_l em kg/m^2 ,

p_{ar} (à 20 °C) em kg/m^2 , T em mm, d em mm.

$$\epsilon = 1 - 0,0946 \cdot \left[\frac{v_g^2}{g \cdot h} \cdot \left(\frac{p_g}{p_l} \right) \right]^{-0,2} \quad (2.20)$$

A equação (2.19) foi obtida para o sistema água-ar e é recomendada, segundo os próprios autores, apenas para sistemas pouco ou não espumantes. A equação (2.20) foi obtida a partir de dados experimentais de vários sistemas. Os autores comentam que avaliaram a aplicabilidade desta equação aos dados experimentais de Kotscherqin e colaboradores, que fizeram medidas com 16 misturas diferentes sob condições destilantes. O ajuste desses dados com a equação (2.20) ficou na faixa de $\pm 15\%$.

CRUZ (1983) propõe as seguintes equações para o cálculo da altura de líquido retido e da porosidade:

$$h = 1,0 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{(L^*)^{0,9} \cdot v_g^{1/3} \cdot \rho_g^{0,4} \cdot (\mu_1/\rho_1)^{0,2}}{g \cdot \rho_1 \cdot (\phi)^3 \cdot D_c^{1,8} \cdot (d/T)^{0,8}} \quad (2.21)$$

$$\epsilon = 0,72 \cdot \left(\frac{v_g^2}{g \cdot h} \right)^{0,05} \cdot (\phi)^{0,03} \quad (2.22)$$

As equações (2.21) e (2.22) foram obtidas em pratos perfurados sem vertedores operando com os sistemas água-ar e solução aquosa de etanol-ar e desta forma aplicam-se a sistemas espumantes ou não. Porém os experimentos foram realizados em um modelo hidráulico e não em condições destilantes.

As equações (2.19) e (2.20) e as equações (2.21) e (2.22) podem ser combinadas com a equação (2.18) para se calcular a altura da dispersão formada.

GIMENES (1986) estudando uma coluna de pratos perfurados sem vertedores destilando o sistema etanol-água propõe a seguinte equação para o cálculo da altura da dispersão:

$$H = \frac{0,11291 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{g \cdot d}{v_g^2} \right)^{1,024} \cdot T}{(\phi)^{2,78} \cdot \left(\frac{L}{V} \right)^{1,084} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} \right)^{0,699} \cdot \left(\frac{\rho_1}{\mu \cdot v_g} \right)^{3,523}} \quad (2.23)$$

Esta equação foi obtida numa faixa de área livre de 8,3 a 28,5%.

O efeito das propriedades físico-químicas das fases sobre a altura da dispersão é um fator que foi estudado por vários autores. ZUIDERWEG e HARMENS (1958), VIVIAN e KING (1963), BAINBRIDGE e SAWISTOWSKI (1964), FANE e SAWISTOWSKI (1968) estudaram o efeito da tensão superficial na altura da dispersão em vários sistemas binários de líquidos. Eles determinaram que existem misturas de líquidos que formam uma maior quantidade de dispersão que outros, operando em condições similares. Encontraram que a maior ou menor facilidade de uma mistura formar bolhas estáveis está relacionada com a variação da tensão superficial desenvolvida no refluxo. Assim, são identificados três tipos de sistemas segundo ZUIDERWEG e HARMENS (1958):

- Negativos: com menor capacidade de formar espuma, onde o refluxo decresce em tensão superficial.

- Positivos: misturas com maior capacidade de formar espuma, onde o refluxo cresce em tensão superficial, ou seja, o componente mais volátil tem a menor tensão superficial.

Nestes dois casos, as volatilidades relativas no sistema devem ser grandes o suficiente para permitir o desenvolvimento de gradientes apreciáveis na tensão superficial.

- Neutros: são sistemas em que os componentes não tem diferença na tensão superficial ou nos quais a volatilidade relativa é muito baixa; consequentemente os gradientes na tensão superficial são pequenos.

Num sistema identificado como positivo, o efeito da estabilização das bolhas na dispersão, provocado pela variação

da tensão superficial pode ser explicado da seguinte forma, segundo KING (1980): durante a destilação, o líquido na espuma se encontra mais empobrecido no componente mais volátil nos locais onde a película líquida é mais fina. Como o sistema considerado é positivo, o componente mais volátil tem a menor tensão superficial. Consequentemente, naqueles locais onde o líquido está mais pobre no componente mais volátil (regiões de película mais fina), o líquido irá apresentar uma tensão superficial maior do que nas regiões adjacentes da película, mais espessas. O gradiente de tensão superficial que se forma nesta superfície, produz uma força impulsora que provoca o fluxo de líquido no sentido da região de tensão superficial menor para a região de tensão superficial maior. Como resultado disto, as regiões de película mais finas se tornam mais espessas e se reforçam, proporcionando a estabilidade das bolhas na dispersão. A figura 2.13 ilustra este fenômeno.

Está ilustrado então, que a maior estabilidade das espumas num sistema positivo será acentuada se tivermos grandes diferenças na tensão superficial dos componentes, elevada volatilidade relativa e também uma grande diferença na composição em cada prato da coluna.

BAINBRIDGE e SAWISTOWSKI (1964) chamam a atenção que quando a intenção for operar no regime "spray", os sistemas recomendados são os negativos, baseado na mesma análise feita para os sistemas positivos, pois nestes sistemas a formação de gotículas é favorecida conforme está representado na figura 2.14.

THOROGOOD (1963) cita estudos realizados sobre a característica de formação de espumas em misturas de líquidos

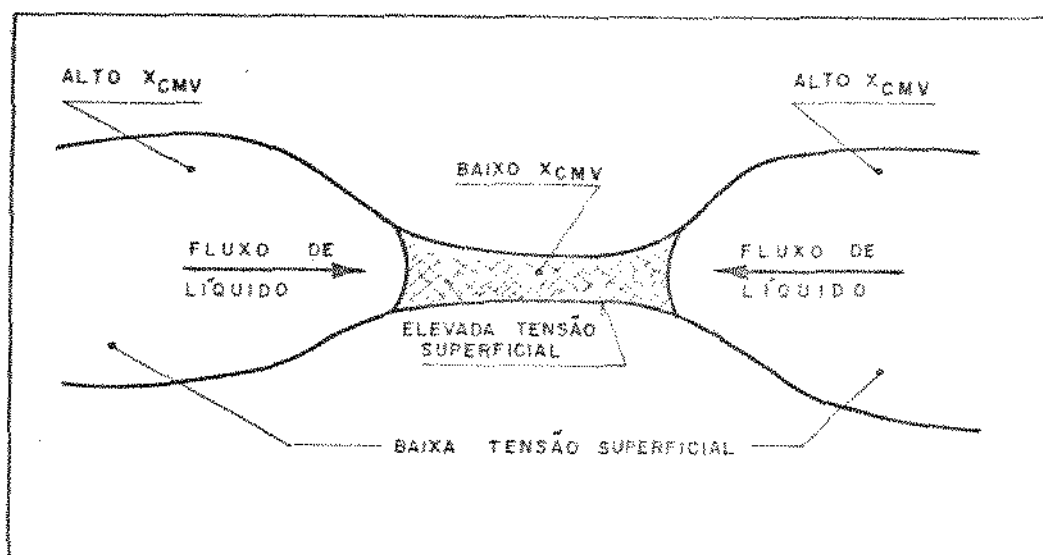


Figura 2.13.- Efeito da Tensão Superficial na Estabilização das Bolhas em um Sistema Positivo

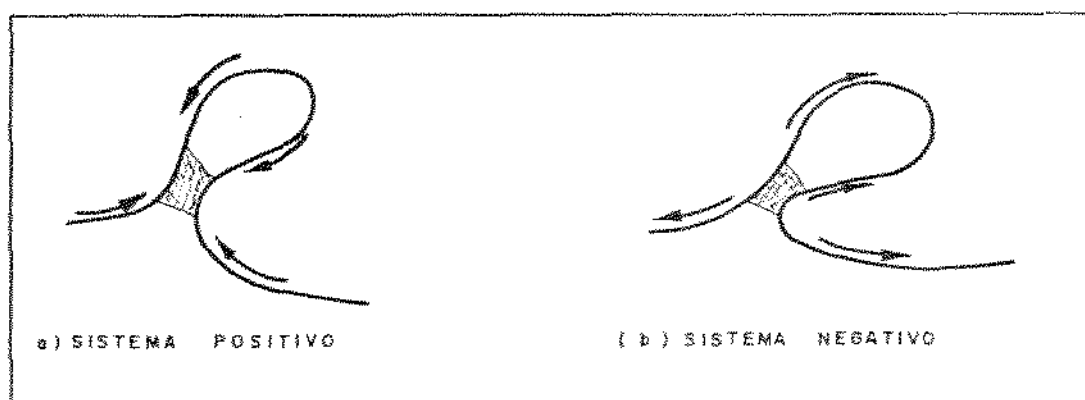


Figura 2.14.- Efeito da Tensão Superficial na Formação das Gotículas do Regime "Spray" em Sistemas Positivos e Negativos

Obs.: As área quadriculadas indicam regiões de tensão superficial mais elevada e as setas indicam o movimento do líquido.

sem transferência de massa. Eles previam que a maior capacidade de formação de espuma ocorre quando a variação na tensão superficial ($\Delta\sigma$) é máxima:

$$\Delta\sigma \text{ é proporcional à } O(x) \cdot (d\sigma/dx)^2 \quad (2.24)$$

$$O(x) = \frac{x \cdot (1-x)}{1-x+k \cdot x} \quad (2.25)$$

onde k = razão entre os volumes molares dos componentes de baixa e alta tensão superficial respectivamente.

x = concentração do componente de menor tensão superficial.

Assim sendo, uma espuma apreciável só se forma se o grupo $x \cdot (d\sigma/dx)^2 > 10^3 \text{ dinas}^2/\text{cm}^2$ e que a máxima altura de espuma ocorreu para $x < 0,05$. THOROGOOD (1963) comenta que a segunda condição não é observada nos equipamentos de destilação. Ele cita que isto provavelmente se deva a que as variações na tensão superficial devidas a transferência de massa dominam outros efeitos menores.

RYLEK e STANDART (1964) comentam que pequenas diferenças de alturas encontradas nos estudos com modelos hidráulicos podem ser explicados pela má distribuição do gás no prato inferior e pela má distribuição do líquido no superior. A mesma opinião é apresentada por SHARMA e GUPTA (1967) que em seus experimentos encontraram diferenças de altura no prato inferior e superior quando comparados aos pratos intermediários.

rios. RYLEK e STANDART (1964) porém já chamavam a atenção de que na destilação este fato poderia ser complicado pelas variações na concentração através da coluna e também pelas variações nas propriedades físicas do líquido na espuma. Segundo eles, isto poderia explicar as diferenças nas alturas das dispersões em pratos diferentes.

De todas as equações apresentadas aqui para o cálculo da altura da dispersão, a equação (2.23) parece ser a mais recomendada, pois ela leva em consideração o efeito da transferência de massa na altura da dispersão. Porém existe uma variável que não está sendo levada em consideração nesta equação e que pode auxiliar na justificativa das diferenças nas alturas da dispersão nos vários pratos encontrados por GIMENES (1986). Esta variável é a vazão volumétrica ou a velocidade superficial do líquido. Desta forma, procuraremos neste trabalho correlacionar os dados da altura da dispersão levando em conta o efeito da transferência de massa, a velocidade superficial do líquido e do vapor, os parâmetros geométricos dos pratos e as propriedades físicas da dispersão.

2.5.- PONTO DE RETENÇÃO DE LÍQUIDO

Para a operação normal de uma coluna de pratos, é necessário que se forme uma camada de dispersão vapor-líquido sobre os pratos. Desta forma, outro aspecto hidrodinâmico das colunas que empregam os pratos perfurados sem vertedores é o limite inferior de operação, representado pelo ponto em que se inicia a retenção de líquido. Este limite inferior é conhecido

como o "ponto de retenção de líquido" e é determinado pelas velocidades mínimas das fases líquida e gasosa necessárias para que se inicie a retenção.

RYLEK e STANDART (1964) apresentam uma descrição das etapas que se sucedem até que se atinga o ponto de retenção de líquido e que sendo mantida a vazão do líquido constante, teremos:

1º) Em velocidades suficientemente baixas de gás não ocorre a retenção de líquido sobre os pratos. O gás passa livremente pelas aberturas e o mesmo acontece com o líquido. Essa passagem das duas fases pelos orifícios pode ser de dois modos diferentes, ou seja, passagem em orifícios diferentes, o que ocorre quando os diâmetros dos orifícios são menores ou em um mesmo orifício, quando os diâmetros dos orifícios são maiores. Nos dois casos o contato do líquido e do gás ocorre apenas na superfície do líquido (duas fases contínuas). As figuras 2.15 e 2.16 ilustram este comportamento.

2º) Aumentando-se gradualmente a velocidade do gás, as forças de fricção do gás contra o líquido que desce aumentam até um valor tal, de forma que em um dado instante se inicia a formação de uma camada contínua de líquido sobre o prato. Este é o ponto de retenção de líquido e manifesta-se visualmente por esguichos de líquido que é arrastado pela corrente gasosa ao tentar bloquear o orifício, conforme ilustrado na figura 2.17.

RYLEK e STANDART (1964) apresentam o trabalho feito por Cervinka e Cerny que foram os primeiros a fazer uma investigação sistemática do ponto de retenção em pratos perfurados sem vertedores. Utilizaram os sistemas água-ar e óleo-ar em

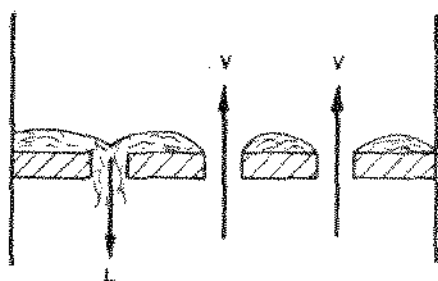


Figura 2.15
Prato Abaixo do Ponto de
Retenção e Escoamento em
Orifícios Diferentes

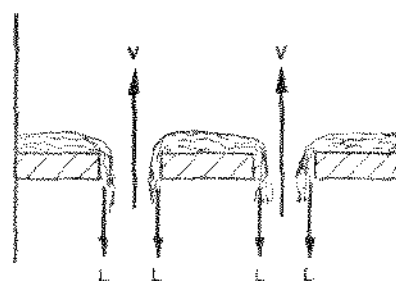


Figura 2.16
Prato Abaixo do Ponto de
Retenção e Escoamento em
Mesmos Orifícios

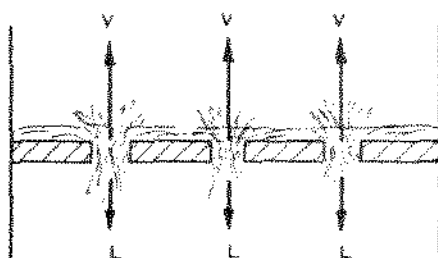


Figura 2.17
Prato no Ponto de Retenção
de Líquido

pratos com área livre de escoamento variando entre 4 e 15%. Os pratos eram do tipo grelha e a largura da grelha foi variada entre 2 e 4 mm. A equação obtida foi:

$$\log \left[\frac{(Q_g)^2}{q \cdot [\Phi(x)]^2 \cdot d} \cdot \frac{P_g}{P_l} \cdot (\mu_l)^{0,26} \right] = -K - 1,75 \cdot \left(\frac{Q_l}{Q_g} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{P_g}{P_l} \right)^{0,125} \quad (2.26)$$

onde $K = 3.23$.

Estudos realizados utilizando uma coluna com $D = 1000$ mm para estudar o ponto de retenção de água em pratos do tipo grelha, mostraram que os resultados com $d = 4$ mm concordaram bem com a equação (2.26) e que os resultados com $d = 8$ mm apresentavam grandes desvios. A explicação para esta diferença está no fato da equação (2.26) ter sido obtida com $d \leq 4$ mm, o que limita a aplicabilidade da equação acima.

RYLEK e STANDART (1964) apresentam também a equação (2.27):

$$Y = B \cdot e^{-4X} \quad (2.27)$$

onde:

$$Y = \frac{(Q_g)^2}{q \cdot d_e \cdot (\Phi)^2} \cdot \frac{P_g}{P_l} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_{\text{água}}} \right)^{0,16} \quad (2.28)$$

$$X = \left(\frac{Q_1}{Q_q} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{P_g}{P_1} \right)^{0,425} \quad (2.29)$$

O valor da constante B no ponto de retenção é dado como 2,95.

As equações (2.26) e (2.27) foram obtidas para pratos do tipo grelha e operando com sistemas não submetidos a destilação, isto é, modelos hidráulicos. Observa-se que as duas equações são bem semelhantes. Em relação a equação (2.27) não existem indicações da faixa de trabalho e características geométricas dos pratos em que esta equação foi obtida. Existe também o fato da constante B variar com o diâmetro da coluna, conforme ilustrado na tabela 2.1 deste capítulo.

RYLEK et alii (1973) apresentam a seguinte equação:

$$G^{0,25} \cdot (P_g/P_1)^{0,25} \cdot v_{g0}^{0,5} = K_1 + K_2 \cdot v_{l0}^{0,5} \quad (2.30)$$

onde:

$$K_1 = 0,267 \cdot (\bar{v}_1/\mu_1^{0,36})^{0,4885} \quad (2.31)$$

$$K_2 = K_3 \cdot [(2.d)/T]^{0,5} \quad (2.32)$$

$$K_3 = -[\ln(\bar{v}_1/\delta_1) - 2,258] \quad (2.33)$$

onde: d em mm, T em mm, v_{g0} e v_{l0} em m/s, ρ em kg/m³, $\bar{v}$ em dina/cm, μ em cP e δ em g/cm³

K_L e K_3 são dependentes somente das propriedades físicas do sistema e são independentes dos parâmetros geométricos do prato. O parâmetro $(2.d/T)^{1/2}$ é quem deve expressar o efeito da abertura. A equação (2.30) foi obtida a partir de dados experimentais dos seguintes sistemas: água-ar, glicerol-ar, querosene-ar medidas em um modelo hidráulico e de dados de destilação a vácuo da mistura fenol- o cresol. No modelo hidráulico a área livre variou de 8,93 até 22,03%. Na destilação a área livre variou de 10,5 até 23,6%.

Os resultados encontrados com a equação (2.30) mostraram que os dados obtidos no modelo hidráulico se ajustaram muito bem enquanto que os dados obtidos com o sistema submetido a destilação apresentaram uma dispersão razoável conforme mostra a figura 2.1B, onde a faixa de vazão de líquido que foi utilizada foi muito pequena.

TAKAHASHI et alii (1979) estudando o ponto de retenção em pratos perfurados sem vertedores, utilizando os sistemas água-ar, solução aquosa de glicerina-ar e solução aquosa de metanol-ar em pratos com área livre variando entre 10,3 e 30,2%, apresentam a seguinte equação:

$$k_2 \cdot (h+T) \cdot \rho_l = k_d \cdot \frac{v_{go}^2 \cdot \rho_g}{2 \cdot q \cdot (1-X)^2} + k_w \cdot \frac{v_{lo}^2 \cdot \rho_l}{2 \cdot q \cdot X^2} \quad (2.34)$$

onde:

$$X = \left[\frac{1}{1 + 1/[k_1 \cdot (Re_l)^2]} \right]^{0.5} \quad (2.35)$$

$$k_1 = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot d^{-5/3} \cdot T^{-0,2} \cdot (\mu_1/\mu_{\text{água}})^2 \quad (2.36)$$

$$h = 0,30 \cdot (T/d)^{-0,4} \cdot (\rho_1/\rho_{\text{água}})^{2/3} \quad (2.37)$$

$$k_2 = 0,268 \cdot d^{-1,273} \quad p/d \leq 0,6 \text{ cm} \quad (2.38)$$

$$k_2 = 0,344 \cdot d^{-0,782} \quad p/d > 0,6 \text{ cm} \quad (2.39)$$

A importância do conhecimento do limite inferior de operação dos pratos perfurados sem vertedores e o não ajuste dos dados obtidos em sistemas submetidos a destilação no estudo feito por RYLEK et alii (1973) e considerando que os demais autores citados acima operaram somente com modelos hidráulicos, justifica o estudo desta condição hidrodinâmica, que é o ponto de retenção de líquido, com sistemas operando em condições destilantes, pois esta será a situação que se encontrará na operação de uma coluna de destilação. Desta forma, procuraremos neste trabalho encontrar uma equação que possa prever o ponto de retenção de líquido em um sistema operando em condições destilantes.

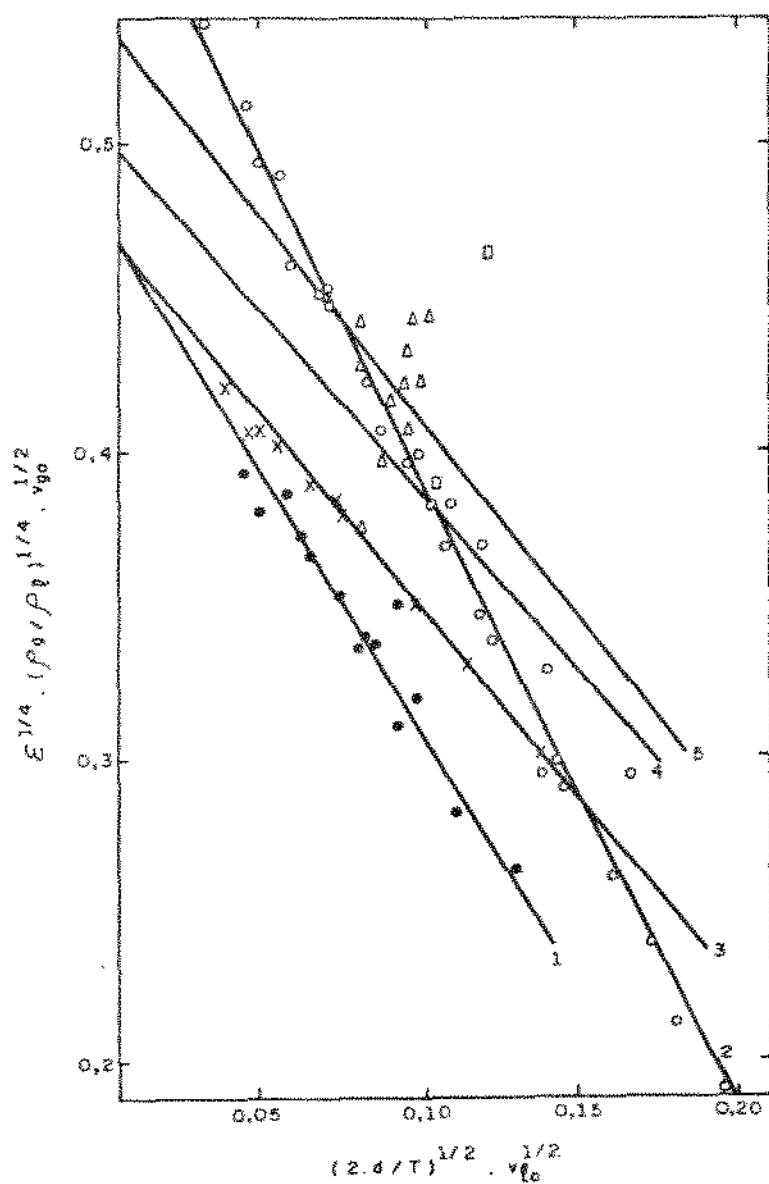


Figura 2.18.- Pontos de Retenção de Líquido Obtidos em Modelos Hidráulicos e em Sistemas Submetidos a Destilação

- glicerol - ar
- água - ar
- x querosene - ar
- metanol - água
- △ fenol - o cresol

[Rylek et alii (1964)]

2.6.- CONCLUSÃO

Neste capítulo é apresentada uma revisão e análise da literatura referente a aspectos hidrodinâmicos de colunas de pratos perfurados sem vertedores. Os tópicos abrangidos compreendem os regimes de escoamento desenvolvidos pelo escoamento em contra-corrente das fases, a transição entre o regime "froth" e o regime "spray", as oscilações da dispersão que ocorrem, a altura da dispersão que se forma e a influência da tensão superficial nesta altura, e por último o ponto de retenção de líquido sobre o prato, que marca o limite inferior de operação destes pratos.

Como se observa neste capítulo, a grande maioria dos trabalhos publicados no estudo da hidrodinâmica destes pratos, foram realizados com modelos hidráulicos que apenas simulam o comportamento da dispersão sobre o prato. Poucos trabalhos utilizaram um sistema submetido a destilação, de forma que sejam levados em consideração os efeitos causados pela transferência de massa sobre a dispersão.

É importante pois, a exemplo de GIMENES (1986), realizar estudos nestas colunas utilizando sistemas líquidos que estejam submetidos a destilação. Só desta forma poderemos levar em consideração os efeitos da transferência de massa e calor no comportamento hidrodinâmico dos pratos perfurados sem vertedores.

CAPÍTULO - 3

EQUIPAMENTO E

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1.- INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é estudar uma coluna de destilação de pratos perfurados sem vertedores. Para este fim construiu-se uma coluna deste tipo, em escala de laboratório, para a coleta dos dados experimentais. O equipamento construído é formado pela coluna, um condensador, um reservador com aquecimento elétrico e um painel de controle. O equipamento está representado esquematicamente na figura 3.1.

Neste capítulo, além da descrição do equipamento, é apresentado também o procedimento experimental utilizado e as características físico-químicas da mistura de teste.

3.2.- EQUIPAMENTO

3.2.1.- COLUNA DE DESTILAÇÃO

Os vários estágios da coluna foram construídos intercalando-se tubos de vidro pirex com pratos de latão flangeados entre si. Entre os pratos e os tubos de vidro existem anéis de borracha para vedação. O número total de estágios é doze. Dos doze estágios, apenas o superior não era de vidro e sim de latão e ao qual é soldado um tubo lateral para permitir o retorno à coluna do líquido condensado correspondente ao refluxo. A figura 3.2 mostra os detalhes de montagem dos estágios com os tubos de vidro. A coluna tem também um isolamento térmico de isopor.

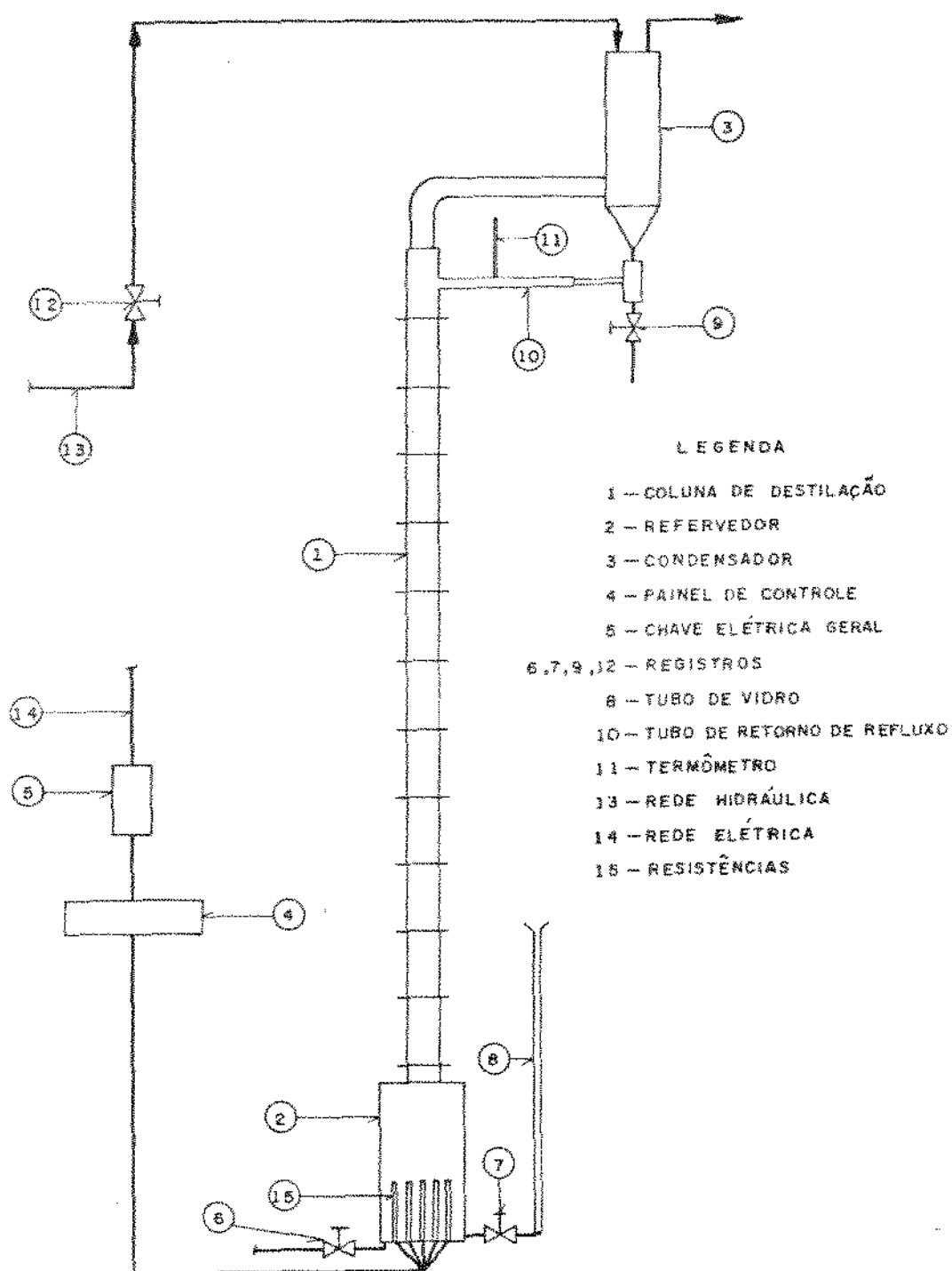


Figura 3.1.- Representação Esquemática do Equipamento Experimental

Prato/Conjunto	Diâmetro do Furo (mm)	Área Livre (%)
1	3,969 (5/32")	9,89
2	4,762 (3/16")	14,25
3	5,500	19,00
4	5,593 (13/64")	22,26
5	6,500	26,54
6	7,000	30,78
7	7,300	33,47
8	7,600	36,28
9	7,937 (5/16")	39,57

Tabela 3.1 - Características Geométricas dos Pratos

As hastes para o flangeamento dos vários estágios são de latão, confeccionados a partir de varetas com diâmetro de 0,31 cm. O comprimento das varetas é de 16,5 cm e em cada extremidade existe 2,0 cm de rosca para permitir a fixação destas hastes. Na fixação de cada estágio utilizam-se três hastes aparafusadas alternadamente nos seis furos da flange do prato.

Os anéis de borracha tem 7,2 cm de diâmetro externo e 5,2 cm de diâmetro interno. A sua espessura é de 0,2 cm.

O isolamento térmico é feito com canaletas de isopor de 3,8 cm de espessura.

Os tubos são de vidro pirex com 5,50 cm de diâmetro interno e 14 cm de altura cada um. Os tubos sendo de vidro permitem a observação direta do comportamento da dispersão em cada estágio.

Os pratos são de latão e tem 9,00 cm de diâmetro e 0,21 cm de espessura. Cada prato possui 19 furos circulares, contidos no diâmetro de 5,50 cm, dispostos em arranjo triangular com espaçamento de 0,975 cm entre os centros dos furos, os quais não são chanfrados. Estes furos são destinados a circulação das fases líquida e vapor. Existem ainda 6 furos com 0,4 cm de diâmetro em cada prato (externos à coluna), dispostos de forma equidistante entre si e colocados em um raio de 4,0 cm do centro do prato e destinados à flange do estágio. A figura 3.3 mostra a disposição dos furos mencionados sobre o prato.

Neste trabalho foram realizados testes utilizando conjuntos de pratos com nove valores diferentes de área livre. A tabela 3.1 apresenta as características geométricas dos pratos utilizados.

Os experimentos foram iniciados com o conjunto de pratos perfurados com área livre igual a 9,89% e após a coleta de todos os dados necessários com este valor de área livre, a coluna era desmontada, o diâmetro de todos os orifícios aumentado para o valor subsequente apresentado na tabela 3.1 e então novamente montada a coluna. E assim se procedeu até o prato com área livre de escoamento igual a 39,57%. Desta forma, todos os pratos da coluna possuíam o mesmo valor de área livre de escoamento em cada experimento que era realizado.

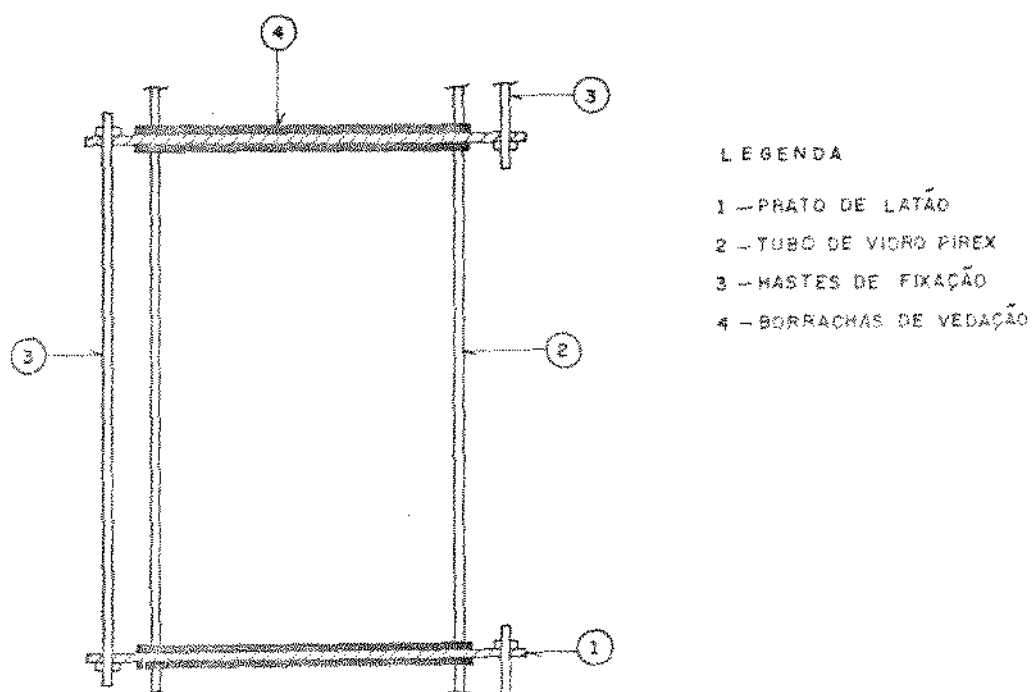


Figura 3.2.- Detalhes de Montagem dos Estágios da Coluna

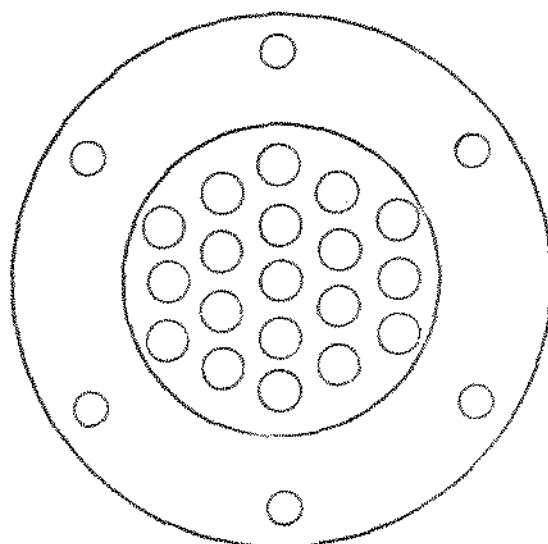


Figura 3.3.- Distribuição dos Orifícios no Prato da Coluna

3.2.2.- CONDENSADOR

O condensador está colocado no topo da coluna, acima do último estágio. No alto da figura 3.1 está representada a posição do condensador no equipamento. Na sua construção utilizou-se uma chapa de latão de 0,075 cm de espessura para a confecção do casco. A chapa foi calandrada e soldada e a parte cilíndrica tem as seguintes dimensões: 60 cm de comprimento e 16 cm de diâmetro. A parte cônica tem 10 cm de altura. As serpentinas são de cobre, de passo triplo. A área de troca térmica é de aproximadamente $1,2 \text{ m}^2$.

Como fluido refrigerante é utilizada a água. Ela entra no condensador à temperatura ambiente. A vazão necessária para a condensação do vapor produzido durante a operação é controlada manualmente pelo registro nº 12 da figura 3.1. A vazão da água é regulada de tal forma que o vapor condensado passe ao estado de líquido saturado.

3.2.3.- REFERVEDOR

O refervedor está colocado na base da coluna e sobre ele está montada a coluna de destilação. Sua posição no equipamento está mostrada na figura 3.1.

Na sua construção utilizou-se uma chapa de latão de 0,075 cm de espessura para a confecção do casco. A chapa foi calandrada e soldada. As dimensões do refervedor são de 45 cm de altura e 24 cm de diâmetro.

A fonte de energia utilizada para o aquecimento é a elétrica e para este fim instalaram-se no refervedor um conjunto de resistências que permitia variar a potência desde 500 watts até 21000 watts. O conjunto de resistências está assim dividido: uma resistência elétrica de 2000 watts, oito resistências elétricas de 500 watts, dez resistências elétricas de 1500 watts.

Na figura 3.1 pode-se observar que o refervedor está equipado com dois registros. O nº 7 tem três finalidades: a) permitir a alimentação da mistura a destilar no refervedor; b) receber o líquido condensado proveniente do condensador, quando a coluna de destilação está operando em regime de refluxo parcial; c) funcionar como um sistema de segurança no caso de ocorrer uma elevação muito grande na pressão do refervedor. Quando a coluna estava em funcionamento este registro permanecia sempre aberto. O registro nº 6 serve para a coleta de amostra do líquido do refervedor e também para a drenagem do refervedor quando necessária.

O tubo de vidro conectado ao registro nº 7 permite o acompanhamento da variação da pressão total no interior do refervedor pela variação da altura de líquido que se observa neste tubo.

3.3.- MISTURA LÍQUIDA UTILIZADA

A mistura líquida utilizada para o estudo da coluna de destilação foi o sistema etanol-água, que na pressão de 1 atm apresenta um azeótropo na fração molar igual a 0,894 em

etanol e tem uma temperatura de ebulição de 78,15 °C. Nas condições em que a coluna irá operar podemos esperar que a temperatura na base alcance uma temperatura igual ou próxima de 100 °C e no topo uma temperatura próxima à do azeótropo. Isto faz com que as propriedades das fases líquida e vapor variem de prato para prato, pois elas são funções da temperatura e da composição.

Nos apêndices A até F estão descritas as relações empregadas e os programas desenvolvidos para a estimativa das propriedades físico-químicas das fases em função da temperatura e da composição em cada prato. Além disto, nestes apêndices estão relacionadas as correlações obtidas para a obtenção da temperatura em função da composição e também da composição de equilíbrio da fase vapor em função da composição da fase líquida. Estes dados são necessários na estimativa das propriedades físico-químicas da mistura na faixa de temperatura e composição de trabalho. A tabela 3.2 apresenta alguns valores das propriedades físico-químicas dos componentes puros na temperatura de 20 °C além da temperatura de bolha e da massa molecular.

Compo- nente	Temp. Ebul. Normal (°C)	Massa Molar (g/mol)	ρ (g/cm3)	μ (cp)	σ (dina/cm)
ETANOL	78,4	46	0,789	1,200	22,80
ÁGUA	100,0	18	0,998	1,002	72,88

Tabela 3.2.- Propriedades Físico e Físico-Químicas dos Componentes Puros a 20 °C.

3.4.- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos feitos com a coluna de destilação foram realizados em refluxo total para todos os pratos relacionados na tabela 3.1 e em refluxo parcial para os pratos de número 5 até 9. Em todos os experimentos realizados eram medidas, para os pratos de nº 1 ao nº 11, a composição da fase líquida, a altura da dispersão e o tipo e o comportamento da dispersão formada sobre cada um dos pratos. No prato nº 12 era medida apenas a composição da fase líquida pois o espaço livre acima deste prato não era visível devido ao tubo de latão utilizado. Eram medidas também a composição do líquido no retervedor e do vapor condensado e a vazão do líquido que retornava à coluna como refluxo, resultado da condensação do vapor que atingia o topo.

3.4.1.- OPERAÇÃO EM REFLUXO TOTAL

A operação da coluna em refluxo total, que se caracteriza pela devolução à coluna de todo o vapor condensado, é realizada da seguinte forma: carrega-se o retervedor com uma solução aquosa de etanol de composição previamente conhecida, abre-se o registro para permitir a circulação de água pelo condensador e ligam-se as resistências elétricas necessárias. Com isto a solução do retervedor se aquece, entra em ebulição produzindo então vapor. Este vapor sobe pela coluna, chega ao condensador onde é totalmente condensado e após a condensação

é devolvido integralmente à coluna, no estado líquido. Isto é conseguido, mantendo-se fechado o registro nr 9 da figura 3.1. A vazão da água de refrigeração do condensador é controlada para que a temperatura do líquido condensado seja aquela do líquido saturado.

A potência de aquecimento escolhida deve ser capaz de produzir uma quantidade de vapor tal que permita que seja re-tido líquido e formada uma dispersão sobre os pratos. A partir do momento em que sobre os pratos exista a dispersão, formada pela interação do líquido que desce com o vapor que sobe, a coluna está em condições de operação. Quando isto ocorre, não significa necessariamente que a coluna esteja trabalhando em regime permanente, pois é necessário um tempo de operação para que tanto a altura da dispersão como a composição em cada prato estabilizem. A coleta dos dados é feita com a coluna operando em regime permanente para cada potência de aquecimento e correspondentes vazões de líquido e vapor. Isto garantirá que se tenham alturas de dispersão e concentrações em cada prato constantes no tempo. Para se ter a garantia de que a coluna está operando em regime permanente é necessária então a determinação desse tempo de estabilização. Ele foi determinado para cada tipo de prato utilizado. Os resultados são apresentados na tabela 3.3.

Quando a coluna está operando em regime permanente inicia-se a coleta dos dados. Inicialmente faz-se a leitura das alturas das dispersões em cada prato, bem como o tipo e o comportamento destas dispersões. A altura da dispersão é medida com uma escala milimétrica que foi colocada externamente em

cada estágio. Como em certos casos a dispersão apresentava oscilações, o valor lido representa o valor médio observado. Em seguida coletam-se as amostras de líquido em cada prato e no refervedor para a medida da composição. A amostra do líquido é retirada com o auxílio de seringas adaptadas na borracha de vedação de cada prato. A quantidade recolhida é de 2,5 ml. A amostra de líquido do refervedor é coletada abrindo-se o registro nº 6, representado na figura 3.1. Em último lugar mede-se a vazão de líquido produzido pela condensação do vapor. Esta medida é realizada no final do experimento pois ela provoca a desestabilização da coluna. Para esta medida procede-se da seguinte forma: abre-se totalmente o registro nº 9, da figura 3.1, para descarregar o líquido que ali se encontra. Ao terminar a descarga do líquido acumulado inicia-se então a medida da vazão pela coleta do líquido que escoar num intervalo de tempo de 30 segundos.

As operações em refluxo total foram feitas com composição molar inicial no refervedor de 1,00%, 1,60%, 2,3% e 3,00% para os pratos de nº 1 a 5 e com 1,00%, 1,60% e 3,00% para os pratos de nº 6 a 9.

Para cada área livre e composição inicial no refervedor fizeram-se experimentos com cinco diferentes taxas de escoamento e também uma determinação com uma taxa de escoamento em que ocorre apenas o início da retenção de líquido sobre os pratos. A variação das taxas de escoamento é conseguida pela variação da potência elétrica fornecida ao refervedor. As taxas de escoamento foram escolhidas de forma a que se abrangesse toda a faixa de operação do prato, desde o ponto de retenção de líquido até o ponto em que a dispersão atinge o prato superior (inundação).

Area Livre (%)	Tempo de Estabilização (min.)
9,89	90
14,25	75
19,00	60
22,26	60
26,54	60
30,77	45
33,47	45
36,28	45
39,57	45

Tabela 3.3.- Tempos de Estabilização para a Operação dos Pratos no Regime Permanente.

3.4.2.- OPERAÇÃO EM REFLUXO PARCIAL

A operação da coluna em refluxo parcial, que se caracteriza pela devolução à coluna, como refluxo, de apenas uma parte do vapor condensado, diferencia-se da operação em refluxo total nos seguintes pontos:

a) Em refluxo parcial o registro nº 9 da figura 3.1 é aberto parcialmente de modo que permita a retirada de uma fração do vapor condensado.

b) A fração do vapor condensado retirada pelo registro nº 9 era dirigida como alimentação ao reboiler, através do registro nº 7.

Dos itens a) e b) tem-se que a vazão de vapor que atinge o topo da coluna e que é condensado, é dividida em duas correntes: uma que retorna ao topo da coluna e deace como refluxo e uma que é retirada da coluna como produto da destilação.

c) A medida das vazões do produto da destilação e do vapor condensado total é realizada da seguinte forma: inicialmente determina-se a vazão do produto recolhido como destilado, medindo-se o volume de destilado que circula no intervalo de 30 segundos. Posteriormente determina-se a vazão total do vapor condensado, abrindo-se totalmente o registro nº 9 e medindo-se o volume que circula num intervalo de 30 segundos. A diferença entre a vazão total do vapor condensado e a vazão do destilado fornece a vazão do líquido que retorna como refluxo pela coluna.

Na operação em refluxo parcial utilizaram-se tres diferentes taxas de vaporização para cada concentração inicial do re fervedor e para cada área livre de escoamento utilizada.

3.4.3.- DETERMINAÇÃO DO PONTO DE RETENÇÃO DE LÍQUIDO

A determinação do ponto de retenção de líquido sobre os pratos foi realizada para todos os tipos de pratos relacionados na tabela 3.1.

Os pontos de retenção foram determinados em duas situações diferentes:

a) Com o prato inicialmente seco, a taxa de vaporização no re fervedor era aumentada gradualmente até que se atin-

gisse o ponto de retenção de líquido sobre ele. A coluna nestes casos operava sempre em refluxo total.

b) Com a coluna operando normalmente, conforme descrito nos itens 3.4.1 e 3.4.2, onde os pratos apresentavam certa quantidade de dispersão, a altura da dispersão aumenta de prato a prato na direção do topo da coluna. Nestes casos, muitas vezes ocorria que algum dos pratos inferiores operava no ponto de retenção. Isto foi feito com a coluna operando tanto em refluxo total como em refluxo parcial.

No caso a) o procedimento experimental pode ser assim descrito: carrega-se o refulvedor com a mistura numa concentração pré-determinada. Inicia-se o aquecimento da mistura. Quando o vapor começa a subir pela coluna varia-se a taxa de vaporização de tal forma que se consiga estabelecer o ponto de retenção em algum dos pratos. Deixava-se operar por meia hora para que se atingisse um regime de operação estável em relação a concentração nos pratos, naquela taxa de vaporização. A seguir coleta-se uma amostra do líquido presente no prato que está no ponto de retenção para a determinação da sua concentração. Em seguida mede-se a vazão e a composição do vapor condensado na saída do condensador afim de calcular as vazões de líquido e vapor nos pratos.

No caso b) o procedimento é o descrito nos itens 3.4.1 e 3.4.2 e quando algum dos pratos opera no ponto de retenção anota-se este fato e coletam-se as amostras para a determinação das concentrações além da medida da vazão e a composição do vapor condensado para a determinação dos dados indicados no parágrafo anterior.

3.4.4.- CÁLCULO DAS VAZÕES E DAS VELOCIDADES DAS DUAS FASES

No escoamento em contra corrente das duas fases, a medida das vazões do líquido e do vapor em cada estágio é praticamente impossível. A medida da vazão em cada estágio por si só alteraria a hidrodinâmica do escoamento e/ou poderia provocar a desestabilização da coluna. Em função disto, as vazões e as velocidades em cada estágio foram calculados a partir da medida da vazão do vapor condensado no topo da coluna.

Na operação em refluxo total, aplicou-se um balanço de massa e energia em cada estágio com as seguintes considerações:

- a coluna é adiabática, onde o isolamento térmico com as canaletas de isopor faz com que a coluna se aproxime dessa condição.

- o condensador é total

- a mistura das fases em cada estágio é perfeita.

O método empregado para o cálculo das vazões e das velocidades das duas fases em cada estágio está descrito no apêndice G. Nos cálculos em refluxo total encontrou-se que as vazões molares das duas fases e a vazão volumétrica ou a velocidade superficial do gás permanecem praticamente constantes. A vazão volumétrica ou a velocidade superficial do líquido porém variam de forma significativa. Na tabela 3.4 apresentam-se os resultados obtidos num dos experimentos para ilustração.

Prato	L(mol/s)	V(mol/s)	v_g (cm/s)	$v_l \cdot 10^2$ (cm/s)
1	0,046	0,047	62,64	5,84
2	0,047	0,048	62,56	7,85
3	0,048	0,048	62,64	9,02
4	0,048	0,048	62,70	10,00
5	0,048	0,048	62,76	10,58
6	0,048	0,048	62,91	10,90
7	0,048	0,048	62,98	11,40
8	0,048	0,048	63,02	11,66
9	0,048	0,048	63,14	11,81
10	0,048	0,048	63,12	12,11
11	0,048	0,048	63,12	12,11
12	0,048	0,048	63,12	12,11

Tabela 3.4.- Vazões molares e velocidades superficiais das fases nos pratos da coluna.

Obs.: Dados referentes à um experimento em que: $\phi = 22,26\%$, refluxo total e concentração inicial de álcool no referdor = 3,00% em fração molar.

Para o cálculo das vazões e velocidades na operação em refluxo parcial será utilizada uma das observações que foi obtida nos cálculos da operação em refluxo total, ou seja, que as vazões molares das fases líquida e vapor na coluna são praticamente constantes. Em razão disso iremos utilizar para a fase líquida que $L(i) = L(\text{cond.}) = L(\text{refluxo})$ e para a fase

vapor que $V(1) = V(12) = V(\text{cond.})$. Esta hipótese é normalmente utilizada no cálculo aproximado de colunas e ficou provada sua validade nos cálculos das vazões em refluxo total. Neste trabalho a validade de sua utilização fica mais reforçada ainda pelo fato da coluna estar isolada termicamente e que a entalpia molar de vaporização do etanol e da água são aproximadamente iguais:

$$\Delta H_{\text{vap, EtOH}} = 11.510 \text{ cal/mol}$$

$$\Delta H_{\text{vap, H}_2\text{O}} = 11.700 \text{ cal/mol}$$

3.4.5.- MEDIDA DA COMPOSIÇÃO DA FASE LÍQUIDA

Todos os valores das propriedades físico-químicas e vazões utilizadas nos cálculos e correlações se baseiam no valor da composição da fase líquida. Para a medida desta composição em cada prato, coleta-se uma amostra de aproximadamente 2,5 ml de cada estágio da coluna, do refeedor, do vapor condensado e quando a coluna operava em refluxo parcial, do destilado. A coleta nos estágios da coluna é feita com seringas conforme descrito no item 3.4.1.

O método de análise da composição é baseado no índice de refração da mistura etanol-água. O equipamento utilizado é um refratômetro tipo Abbé, da marca Atago.

Para permitir a análise das amostras do líquido, determinou-se inicialmente a curva de calibração do índice de refração em função da composição volumétrica do etanol. A temperatura utilizada foi de 20 °C, mantida constante por meio da circulação de um banho controlado termicamente. A curva de

calibração apresenta um máximo no índice de refração para a composição volumétrica do etanol na faixa de 80 a 90%. Isto impede a utilização da curva na faixa de composições mais elevadas. Na figura 3.4 está representada a curva de calibração. Para se evitar as leituras onde o máximo da curva o impede, decidiu-se diluir as amostras com igual volume de água e desta forma utiliza-se a região até aproximadamente 50% em volume de etanol, região esta que apresenta boa resolução.

Para se encontrar a composição volumétrica a partir do índice de refração, ajustaram-se equações que representam a curva de calibração. As equações obtidas foram:

1) para $IR \leq 1,3375$:

$$CV = (-6,5692 + 2,0335.I + 5,8960.10^{-3}.I^2).FD \quad (3.1)$$

2) para $1,3375 < IR \leq 1,3590$:

$$CV = (0,5081 + 0,5035.I + 0,1085.I^2 - 3,4390.10^{-3}.I^3 - 1,1.10^{-5}.I^4 + 1,7.10^{-6}.I^5).FD \quad (3.2)$$

onde: CV = composição volumétrica em etanol (%)

FD = fator de diluição

$I = (IR - 1,33).1000$

IR = índice de refração

Como 1,0 ml da amostra coletada era diluído com um volume igual de água, o fator de diluição é igual a 2,0.

O erro envolvido neste método de medida da composição volumétrica é de 0,6%.

Nos cálculos das propriedades físico-químicas e das vazões das fases, a concentração utilizada está em fração molar ou fração em peso. Por isso, a composição volumétrica encontrada com as equações (3.1) e (3.2) é transformada em fração molar e fração em peso com o auxílio das seguintes equações:

- Transformação da fração volumétrica em fração molar:

$$x_a = 1 / (1 + [(1 - x_v) / x_v] 1.3,239) \quad (3.3)$$

- Transformação da fração molar em fração em peso:

$$x_p = 1 / (1 + [(1 - x_a) / x_a] \cdot (18/46)) \quad (3.4)$$

onde: x_a = fração molar do etanol

x_v = fração volumétrica do etanol

x_p = fração em peso do etanol.

CAPÍTULO - 4

ANÁLISE DOS
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1.- INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é a apresentação e a análise dos resultados experimentais encontrados no estudo do comportamento hidrodinâmico da coluna de pratos perfurados sem vertedores, operada com a mistura etanol-água submetida a destilação.

Os aspectos estudados são os regimes de escoamento e os tipos de dispersão, a transição "froth-spray", que se refere a transição da dispersão que apresenta a fase vapor dispersa na fase líquida ("froth") para a dispersão que apresenta a fase líquida dispersa na fase vapor ("spray"). Além disto são estudados também a altura da dispersão que se forma, o ponto de retenção de líquido sobre o prato e as oscilações da dispersão. Estes estudos são realizados em função das vazões ou velocidades das duas fases, dos parâmetros geométricos dos pratos e das propriedades físico-químicas da mistura.

4.2.- REGIMES DE ESCOAMENTO E TIPOS DA DISPERSÃO

4.2.1.- Descrição dos regimes de escoamento e das dispersões

Todos os experimentos realizados com a coluna iniciaram-se da forma descrita no capítulo 3, tendo-se observado que no período transiente a formação de dispersões se inicia no

prato do topo e vai progressivamente avançando para os pratos inferiores da coluna. O tempo necessário para que todos os pratos de um certo experimento apresentem a dispersão mostrou ser dependente do valor da área livre de escoamento; este tempo diminui com o aumento da área livre.

Os tipos de dispersão observados nos diferentes experimentos podem ser assim descritos:

1.- Retenção mínima (ponto de retenção): situações onde o líquido começava a ficar retido sobre o prato;

2.- "Spray": dispersões onde se observava apenas uma grande quantidade de gotículas até uma certa altura acima do prato. Não ocorria a formação de espuma.

3.- Dispersões do tipo espuma celular, que apresentavam grandes bolhas poliédricas separadas apenas por um fino filme de líquido e que praticamente não apresentavam agitação.

4.- Dispersões do tipo "froth", também apresentavam bolhas de gás, porém menores, que se apresentavam separadas por uma quantidade maior de líquido e não apenas por um fino filme como no caso da espuma celular. A dispersão apresenta uma turbulência mais acentuada que a anterior.

5.- Dispersões que se situavam entre as descritas em 2 e 4, caracterizadas por intensa agitação, onde a massa da dispersão era arremessada como "jatos", porém sem ser enquadrada como tipicamente "spray" nem tipicamente "froth". Ver o prato (II) da figura 4.2.

6.- Dispersões que se situavam entre as descritas em 3 e 4, onde a região inferior da dispersão, numa proporção de $1/3$ à $2/3$ da altura era do tipo 4 e o restante era do tipo 3.

7.- Dispersões do tipo "froth" e que apresentavam gotículas na parte superior que se assemelhavam a um "spray".

Na condição de refluxo total, os tipos 1, 2 e 5 apareciam nos pratos inferiores da coluna, podendo inclusive ocorrer os três num mesmo experimento, em pratos diferentes. Neste caso, a sequência em que apareciam, partindo do refeedor eram: 1, 2 e 5.

As dispersões do tipo 3 e 6 ocorreram apenas nos pratos com menor área livre de escoamento (até 19%).

As etapas que se sucedem num mesmo prato desde o ponto anterior a retenção de líquido até o ponto em que a dispersão atinge o seu estado final de formação podem ser assim descritas:

- inicialmente o prato está seco, pois não existe líquido descendo como refluxo;

- com o início do retorno do líquido condensado atinge-se o ponto de retenção que logo passa a um estado de "spray" incipiente ou mesmo um "spray" bem caracterizado; este último, principalmente nos pratos com área livre acima de 20%. Este regime "spray" algumas vezes já é o estado final da dispersão quando a coluna atinge o estado de operação estável;

- após o regime de "spray" incipiente podem ocorrer dois caminhos distintos:

- 1º) Nos pratos com áreas livres de 9,89%, 14,25% e 19%, quando estes operam em velocidades de vapor mais baixas, pouco acima da velocidade de vapor que provoca a primeira retenção de líquido nos pratos superiores da coluna, o estado de "spray" incipiente passa a uma dispersão do tipo espuma celular, caracterizada pelas suas bolhas grandes que deformam-se em poliedros e são separadas por uma fina película de líquido. A dispersão praticamente não apresenta turbulência.

2º) Nos mesmos pratos relacionados no item anterior, porém operando em velocidades de vapor mais elevadas, e em todos os outros pratos relacionados na tabela 3.1, após o estado de "spray" incipiente segue-se o estado de "spray" bem caracterizado. Após o regime "spray" segue-se um estado intermediário entre este e o regime "froth", onde já existem bolhas livres no seio da massa líquida, características do regime "froth", porém a massa da dispersão é arremessada em jatos para cima e/ou contra as paredes da coluna. Este comportamento está representando uma transição entre o regime "spray" e o regime "froth" e também é em algumas vezes o estado final da dispersão em pratos mais próximos ao refulvador quando a coluna atinge a estabilidade no seu funcionamento.

A última etapa é a formação de uma dispersão do tipo "froth" bem característica. O regime "froth" formado, dependendo da velocidade do vapor e da área livre de escoamento do prato, varia desde um "froth" pouco turbulento até um "froth" com elevada turbulência interna, forte pulsação da dispersão na vertical e uma acentuada presença de gotículas sobre a dispersão. O "froth" pouco turbulento ocorreu nos pratos de 19 à 26,54% de área livre quando estes operavam com a velocidade de vapor pouco acima da velocidade mínima que provoca o ponto de retenção de líquido nos pratos. À medida que se aumenta a velocidade do vapor na coluna, aumenta também a turbulência, a pulsação na vertical e a presença de gotículas sobre a dispersão. Nas velocidades mais altas empregadas em cada prato, durante a pulsação a dispersão e as gotículas chegam a alcançar a base do prato superior. Os pratos com área livre igual ou superior a 30,77%, excessão feita aos casos em que estes ope-

ram no regime "spray", apresentam sempre o "froth" do segundo tipo, onde a turbulência, a pulsação na vertical e a presença de gotículas sobre ela aumentam com a velocidade do vapor.

Nos pratos que apresentam dispersões do tipo "froth" são observadas três regiões distintas:

- na base do "froth", imediatamente acima do prato, existe uma camada de líquido através da qual as bolhas passam em alta velocidade e em movimento ascendente;

- acima desta camada está a dispersão; a turbulência desta dispersão aumenta com a velocidade do vapor.

- acima do "froth" aparece uma região com gotículas, como um "spray", cuja intensidade varia com a velocidade do vapor.

Nos pratos que apresentam dispersões do tipo espuma celular ocorrem apenas duas regiões distintas:

- a camada de líquido acima do prato, através da qual passam as bolhas;

- acima desta camada está a dispersão do tipo espuma celular com suas bolhas grandes e poliédricas. A região com gotículas praticamente inexiste.

A partir do momento em que a coluna está operando de forma estável, sem alterações na altura da dispersão e composição em cada prato, pode-se observar o seguinte:

- a) conforme está ilustrado na figura 4.2, o tipo da dispersão presente em cada prato da coluna nem sempre é o mesmo, enquadrando-se em algum dos descritos no segundo parágrafo do item 4.2.1;

- b) a quantidade (altura) da dispersão nos pratos próximos ao refulvador é sempre menor quando comparados aos do

topo da coluna e muitas vezes nem chegam a formar dispersão, ficando abaixo do ponto de retenção de líquido. A ocorrência de pratos abaixo do ponto de retenção de líquido se acentuou com o aumento da área livre de escoamento;

c) Nos pratos superiores tende-se a uma estabilização da altura da dispersão.

As situações descritas em a), b) e c) apareceram nas diferentes áreas livres de escoamento, em diferentes velocidades de vapor e com diferentes concentrações iniciais de etanol no refulvador.

A análise e a justificativa para as observações descritas em a), b) e c) será feita no item 4.4.1, quando se estudar a altura da dispersão.

4.2.2.- Velocidades das Fases para os Diferentes Regimes

Na análise dos regimes de escoamento observa-se que as faixas de velocidades em que eles ocorrem são distintas. Na tabela 4.1 apresentam-se as faixas de velocidades das duas fases nas quais ocorrem os regimes "spray", espuma celular e "froth". Analisando esta tabela inicialmente em relação aos dados dos regimes "spray" e "froth" observa-se que as faixas de velocidades do vapor para estes dois regimes são praticamente as mesmas em cada área livre de escoamento. O mesmo não acontece em relação a velocidade da fase líquida. Desta forma, para uma mesma faixa de velocidades do vapor, o regime "spray" ocorre em velocidades inferiores da fase líquida enquanto o regime "froth" ocorre nas velocidades superiores. Isto pode

ser explicado da seguinte forma: para uma velocidade menor do líquido, menor é a sua vazão e desta forma a carga hidrostática devida ao líquido ainda permite a sua transformação em "spray" pela energia cinética do vapor. A medida em que a vazão do líquido aumenta, a sua carga hidrostática também aumenta e a energia cinética do gás passa a ser insuficiente para transformar o líquido em "spray".

REGIME DA DISPERSÃO						
ϕ (%)	SPRAY		CELULAR		FROTH	
	veloc. superf.		veloc. superf.		veloc. superf.	
	vapor (cm/s)	líquido (cm/s.10 ²)	vapor (cm/s)	líquido (cm/s.10 ²)	vapor (cm/s)	líquido (cm/s.10 ²)
9,89	19-36	1,25- 2,20	19-21	2,18-3,93	29-45	1,85- 6,55
14,25	33-45	2,65- 3,70	27-33	3,43-5,32	40-54	3,70-10,55
19,00	39-77	3,55- 5,55	39-42	5,45-7,95	48-77	5,30-14,10
22,26	48-94	4,60- 6,50	-- --	-----	48-97	6,50-17,60
26,54	65-105	6,15- 8,80	-- --	-----	65-105	8,80-19,60
30,77	67-118	7,85-12,00	-- --	-----	69-118	12,00-22,25
33,47	74-133	8,50-13,00	-- --	-----	74-133	12,95-22,70
36,28	96-146	9,40-13,90	-- --	-----	97-146	14,35-27,20
39,57	92-158	11,00-16,20	-- --	-----	118-158	16,20-28,70

Tabela 4.1.- Faixas de velocidades superficiais das duas fases para os regimes indicados

O regime de espuma celular apresentou as seguintes características:

1º) Ocorreu apenas nos três primeiros tipos de pratos e principalmente nos dois primeiros.

2º) A faixa de velocidades da fase vapor corresponde ao início da faixa de velocidades do regime "spray" e é sempre inferior a faixa de velocidades do regime "froth".

3º) A faixa de velocidades da fase líquida está acima da do regime "spray" e sobrepõe-se a uma parte das velocidades do regime "froth".

A ocorrência do regime de espuma celular coincide com as previsões feitas por RENNIE e EVANS (1962) e citadas no item 2.2.2 do presente trabalho.

Comparando-se os regimes de espuma celular e "froth" observa-se que para os valores iniciais da velocidade do líquido, e que são praticamente iguais nos dois regimes, as velocidades da fase vapor no regime de espuma celular são sempre menores que as do regime "froth". Isto concorda com a descrição feita por RYLEK e STANDART (1964), item 2.2.3 do presente trabalho, de que a transformação da dispersão do tipo espuma celular em "froth", em uma vazão de líquido constante, ocorre com o aumento da velocidade do gás. Em velocidades mais elevadas do líquido passa a existir somente o regime "froth". Na operação em refluxo total a explicação para este fato torna-se mais clara: na destilação, a velocidade das duas fases está relacionada. Se aumentarmos a velocidade do vapor, aumenta também a do líquido. Assim, para as velocidades mais elevadas do líquido, a velocidade do vapor correspondente já não permite a estabilidade das grandes bolhas da espuma celular, aparecendo desta forma o regime "froth".

Procurando estabelecer as faixas de ocorrência destes regimes em um gráfico, a forma que melhor os representou está ilustrada na figura 4.1.

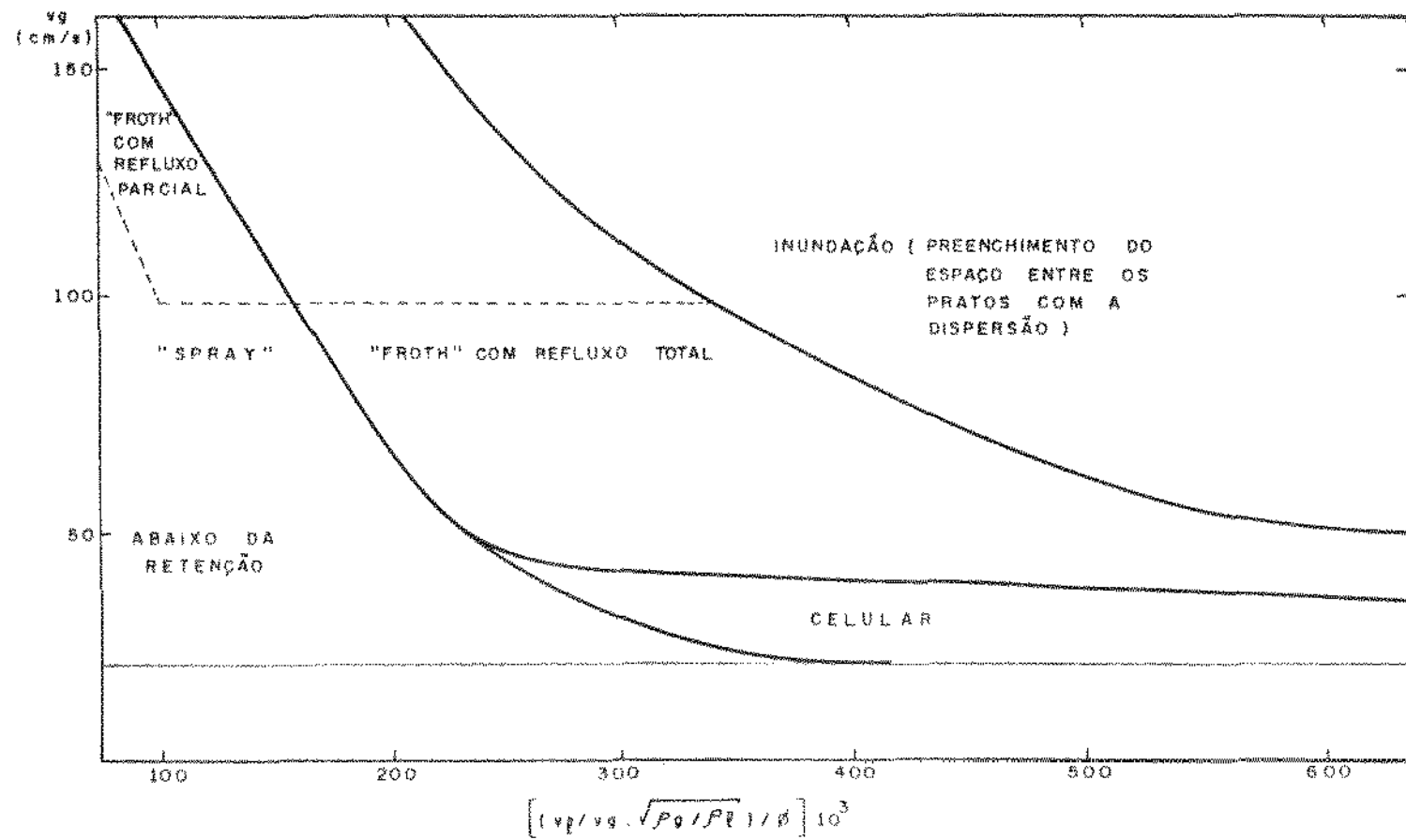


Figura 4.1.- Regiões de Operação para os Diversos Regimes de Escoamento em Pratos Perfurados sem Vertedores

Os regimes "froth" e de espuma celular apresentaram regiões bem definidas enquanto que a região com os pontos em regime "spray" se sobrepõe à região dos pontos em que o prato estava abaixo do ponto de retenção de líquido, não sendo possível separar estas regiões. Para a região de operação no regime "froth" observa-se que com o aumento da velocidade do gás o grupo $([(v_1/v_g) \cdot \sqrt{\rho_g/\rho_l}]^{3/\phi})$ tende a diminuir e que nas regiões de velocidades menores do gás, este mesmo grupo pode assumir valores que variam numa faixa bastante elevada. Com o auxílio da figura 4.1 pode-se prever a operação da coluna de pratos perfurados nos regimes "froth" e de espuma celular, onde o regime "froth" é o que apresenta maior interesse entre os dois para a destilação.

4.2.3.- Efeito da Área Livre de Escoamento

O aumento da área livre de escoamento dos pratos tem uma influência marcante sobre os vários regimes de escoamento. A espuma celular desapareceu por completo com o aumento da área livre, acima de 19,0% sendo que ela só ocorreu nos três primeiros tipos de pratos da tabela 3.1 e principalmente nos dois primeiros. Isto se deve ao aumento das velocidades que acompanham o aumento da área livre. As velocidades mais elevadas do vapor provocam a divisão das bolhas da espuma celular formando então a dispersão do tipo "froth".

O aumento da área livre de escoamento favorece o aparecimento do regime "spray" e de dispersões em pratos operando na região de transição entre os regimes "spray" e "froth". Este fenômeno é analisado no item 4.3 deste trabalho.

A dispersão do tipo "froth" formada nos pratos com área livre igual a 30,77% ou maior apresenta, de forma crescente com o aumento da área livre, uma superfície superior bastante indefinida, mesmo nas menores velocidades do vapor empregadas. A superfície apresenta uma mistura de gotículas e porções da dispersão que se desprendem da massa principal e que dificultam a leitura da altura da dispersão. Na análise desta situação deve-se ter em mente que o aumento da área livre foi conseguido com o aumento do diâmetro dos furos e que a velocidade do vapor também aumenta com a área livre. Este aumento do diâmetro dos furos provoca a formação de bolhas maiores e à medida em que subiam pela dispersão o seu tamanho aumentava ainda mais. Este fator associado às elevadas velocidades do vapor existentes, faz com que quando elas atingem o topo da dispersão onde são destruídas, provoquem um espaço vazio razoável na superfície, produzindo grande quantidade de gotículas além de provocar o arremesso de porções da dispersão das suas vizinhanças, produzindo uma interface bastante indefinida. A diferença no tamanho das bolhas entre a base e o topo da dispersão era perfeitamente visível, devido a coalescência.

Torna-se muito importante ressaltar neste ponto que com o aumento da área livre de escoamento, aumentam as velocidades das fases líquida e vapor, conforme se pode observar na tabela 4.1. Isto implica num aumento considerável da capacidade de produção da coluna. Além disso, observando-se as curvas de composição para o etanol em valores de área livre de escoamento bastante diferentes entre si, como por exemplo nas figuras 4.4 e 4.5, verifica-se que a composição final do destilado

não é muito afetada. O aumento da capacidade da coluna com o aumento da área livre de escoamento sem que a composição final seja afetada de forma considerável, é um dado muito significativo e demonstra que o trabalho com este tipo de coluna pode ser altamente promissor, justificando o seu estudo.

4.3.- TRANSIÇÃO "FROTH-SPRAY"

A importância do estudo da transição entre os regimes "froth" e "spray" já foi comentada no item 2.3 da análise da literatura. A transição é acompanhada pela mudança no comportamento da fase vapor nos orifícios: no regime "spray" o vapor passa na forma de jatos enquanto que no regime "froth" esta passagem ocorre por borbulhamento.

Para permitir a descrição de quais pratos no presente trabalho foram considerados como operando na transição "froth-spray" será utilizado um dos experimentos realizados e que apresenta os tipos de dispersões e suas condições de operação em alguns dos pratos, conforme ilustrado na figura 4.2.

Na figura 4.2 podemos observar que no prato (II) está presente uma dispersão do tipo "spray", onde todo o líquido está disperso na forma de gotículas. Nos pratos (IV) e (V) está presente uma dispersão do tipo "froth" onde o líquido é a fase contínua e o vapor está disperso na forma de bolhas. O prato (III) no entanto, apresenta uma dispersão que não possui uma estrutura bem definida. Ela apresenta momentaneamente uma dispersão do tipo "froth" em algumas regiões do prato, noutras regiões esta dispersão está sendo arremessada para cima ou de

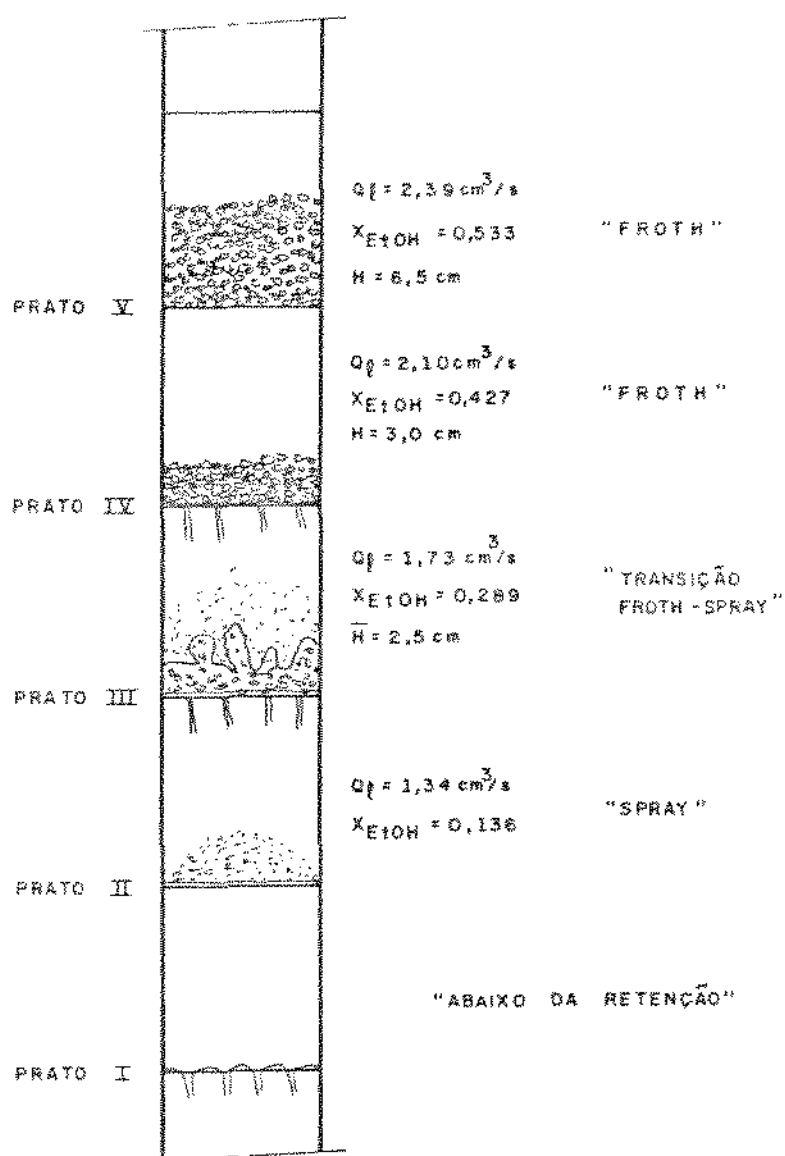


Figura 4.2.- Ilustração do Aspecto das Dispersões sobre os Pratos da Coluna num Determinado Experimento

encontro as paredes da coluna e/ou se desintegrando em gotículas, formando o "spray". Existe uma presença constante e acentuada de gotículas e isto tudo numa turbulência muito forte. Os movimentos da dispersão são totalmente aleatórios. Assim sendo, não é possível enquadrar esta dispersão como sendo do tipo "froth" ou do tipo "spray", mas sim que ela se encontra numa região de transição entre os dois regimes citados.

Deve-se ressaltar que na operação da coluna ela não foi regulada especialmente para obter pratos operando na região de transição. Todas as vezes que algum prato assim se apresentava durante a operação no estado estacionário da coluna, eram anotadas as condições de operação para permitir uma análise posterior.

A ocorrência de pratos operando na região de transição "froth-spray" foi se acentuando com o aumento da área livre de escoamento. Nos pratos com $\phi = 9,89\%$ e $\phi = 14,25\%$ esta região de transição não foi observada, enquanto que no prato com $\phi = 19,00\%$ ocorreu apenas duas vezes. A partir deste valor de área livre, a frequência aumentou de forma considerável. Na tabela 4.2 apresentam-se as porcentagens de ocorrência da transição "froth-spray" em relação ao número total de pontos experimentais em cada valor da área livre de escoamento dos pratos.

Analisando-se as tabelas 4.1 e 4.2 e a descrição das etapas de formação da dispersão apresentada no item 4.2, observa-se que para os três primeiros valores de área livre dos pratos, nas menores velocidades do vapor, a passagem do regime de operação em "spray" para o regime "froth" passa pelo regime de espuma celular. Este estado intermediário de espuma celular

é o responsável pela não ocorrência da transição "froth-spray" nestas situações.

Área Livre (%)	Ocorrências (%)
9,89	0,00
14,25	0,00
19,00	0,91
22,26	5,45
26,54	6,64
30,77	9,96
33,47	9,52
36,28	12,88
39,57	11,36

Tabela 4.2.- Porcentagem de ocorrências observadas da transição "froth-spray" relativamente ao número total de observações em cada valor de área livre.

O aumento da frequência com que esta transição ocorreu com o aumento da área livre de escoamento pode ser explicado pelo favorecimento à ocorrência do regime "spray" com o aumento do diâmetro do orifício e com o aumento da área livre de escoamento, segundo HOFHUIS e ZUIDERWEG (1979), PINCZEWSKI e FELL (1972) e PAYNE e PRINCE (1977). O sistema etanol-água, sendo classificado como positivo, não favorece, porém também não impede a formação do regime "spray" conforme está ilustra-

do na figura 2.14. Como o aumento do diâmetro do orifício favorece o surgimento do regime "spray" devido a condição hidrodinâmica que se desenvolve, a probabilidade de se encontrar pratos operando na região de transição também aumenta, e isto ficou demonstrado pelos resultados experimentais.

A transição "froth-spray", para uma velocidade constante do vapor, ocorre em uma vazão ou velocidade de líquido intermediária a do regime "spray" e do regime "froth". Isto pode ser verificado analisando-se as figuras 4.2 e 4.3 que servem como exemplo. Observando-se o prato (III) da figura 4.2, que ilustra a transição "froth-spray", observa-se que a vazão do líquido é de $1,73 \text{ cm}^3/\text{s}$ contra $2,10 \text{ cm}^3/\text{s}$ no prato (IV) que opera no regime "froth" e $1,34 \text{ cm}^3/\text{s}$ no prato (II) que opera no regime "spray". Na figura 4.3, utilizam-se como exemplos, dados da coluna operando com pratos de área livre igual a 39,57%. O parâmetro utilizado é a vazão do líquido. O regime "spray" ocorre nas menores vazões ou velocidades do líquido, enquanto o regime "froth" ocorre nas maiores. Na região intermediária situa-se a transição entre estes dois regimes.

A influência das propriedades físico-químicas sobre a transição "froth-spray" pode ser avaliada analisando-se a equação 5.10 do capítulo referente à modelagem matemática relativa a altura da dispersão. Aquela equação permite prever a altura da dispersão na transição "froth-spray" e analisando-se o grupo $[\sigma / (\mu_l \cdot v_g)]$ observa-se que ele praticamente não tem significado pelo seu pequeno expoente. Isto sugere que as propriedades físico-químicas, notadamente a tensão superficial, tem um efeito praticamente desprezível sobre esta transição.

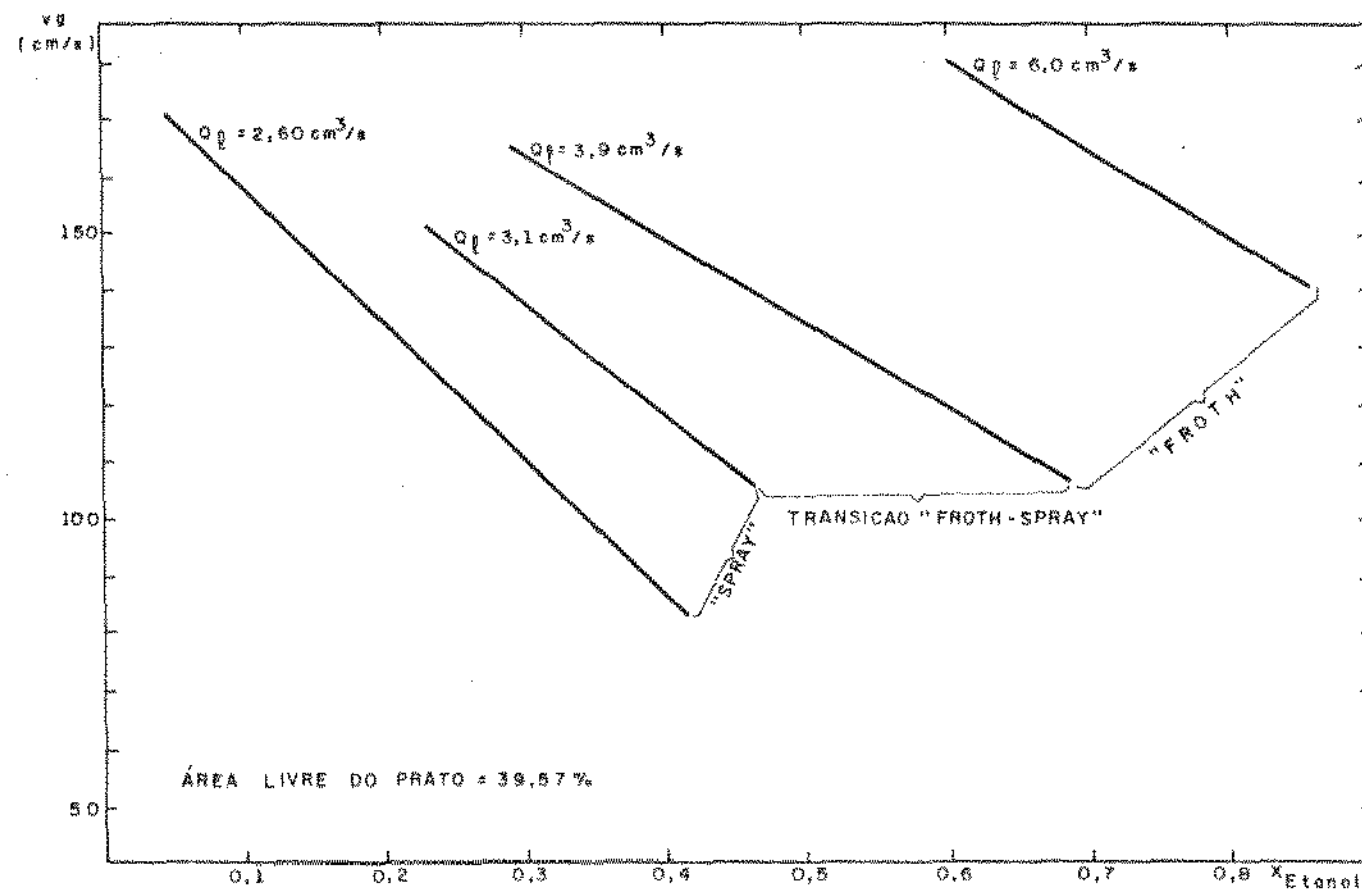


Figura 4.3.- Faixas de Ocorrência dos Regimes "Spray", "Froth" e a Transição entre Eles em Função de v_g versus x_{EtOH} . O parâmetro utilizado é a vazão do líquido.

4.4.- ALTURA DA DISPERSÃO

No trabalho realizado, a altura da dispersão foi medida em todos os estágios da coluna, num total de onze estágios em cada experimento. Nos experimentos realizados em refluxo total, a leitura da altura da dispersão foi realizada para todos os pratos relacionados na tabela 3.1. Nos experimentos realizados em refluxo parcial esta leitura foi realizada nos pratos 5 a 9.

Para cada valor de área livre do prato foram realizadas medidas da altura da dispersão com diferentes taxas de vaporização no reservador, com o objetivo de operar com várias velocidades de vapor e de líquido na coluna.

A medida da altura da dispersão foi dificultada em algumas situações que merecem registro:

a) conforme descrito no item 4.3 e ilustrado na figura 4.2, inúmeras vezes a dispersão formada está na região de transição entre o regime "froth" e o "spray" e nesta situação a leitura da altura da dispersão é dificultada pelos jatos que ocorrem na dispersão e pela sua superfície superior não ser bem definida.

b) Nos pratos com áreas livres mais elevadas, maior ou igual a 30,77%, a dispersão na sua parte superior oscilava de forma bastante acentuada em praticamente todas as velocidades do vapor.

c) Em todos os tipos de pratos, nas velocidades mais elevadas do vapor, a dispersão pulsava na vertical.

4.4.1.- Influência das velocidades do vapor e do líquido

É necessário ressaltar que num mesmo experimento, para uma taxa de vaporização constante no refulvedor, o sistema possui uma velocidade superficial do vapor praticamente constante em todos os estágios da coluna, conforme ilustrado na tabela 3.4 enquanto que a velocidade do líquido varia continuamente.

Analisando-se o comportamento da dispersão em pratos com a mesma área livre, observa-se que a altura da dispersão aumenta com o aumento da velocidade do gás. Isto ocorreu em todas as áreas livres utilizadas no trabalho, tanto em refluxo total como em refluxo parcial. Os gráficos das figuras 4.4 até 4.6 ilustram este comportamento para algumas áreas livres utilizadas. Os gráficos das figuras 4.4 e 4.5 representam experimentos com refluxo total enquanto que a figura 4.6 representa um experimento com refluxo parcial. Para todos os outros tipos de pratos relacionados na tabela 3.1 o comportamento foi similar ao apresentado nas figuras 4.4 a 4.6.

Nas figuras citadas acima observa-se que a altura da dispersão para uma mesma velocidade do gás cresce rapidamente nos pratos inferiores, próximos ao refulvedor, até um certo valor quando então ela praticamente estabiliza para os pratos restantes, chegando até a decrescer um pouco em alguns casos. No item 4.2 estas diferenças nas alturas das dispersões em um mesmo experimento também já foram citadas. Agora procuraremos justificá-las.

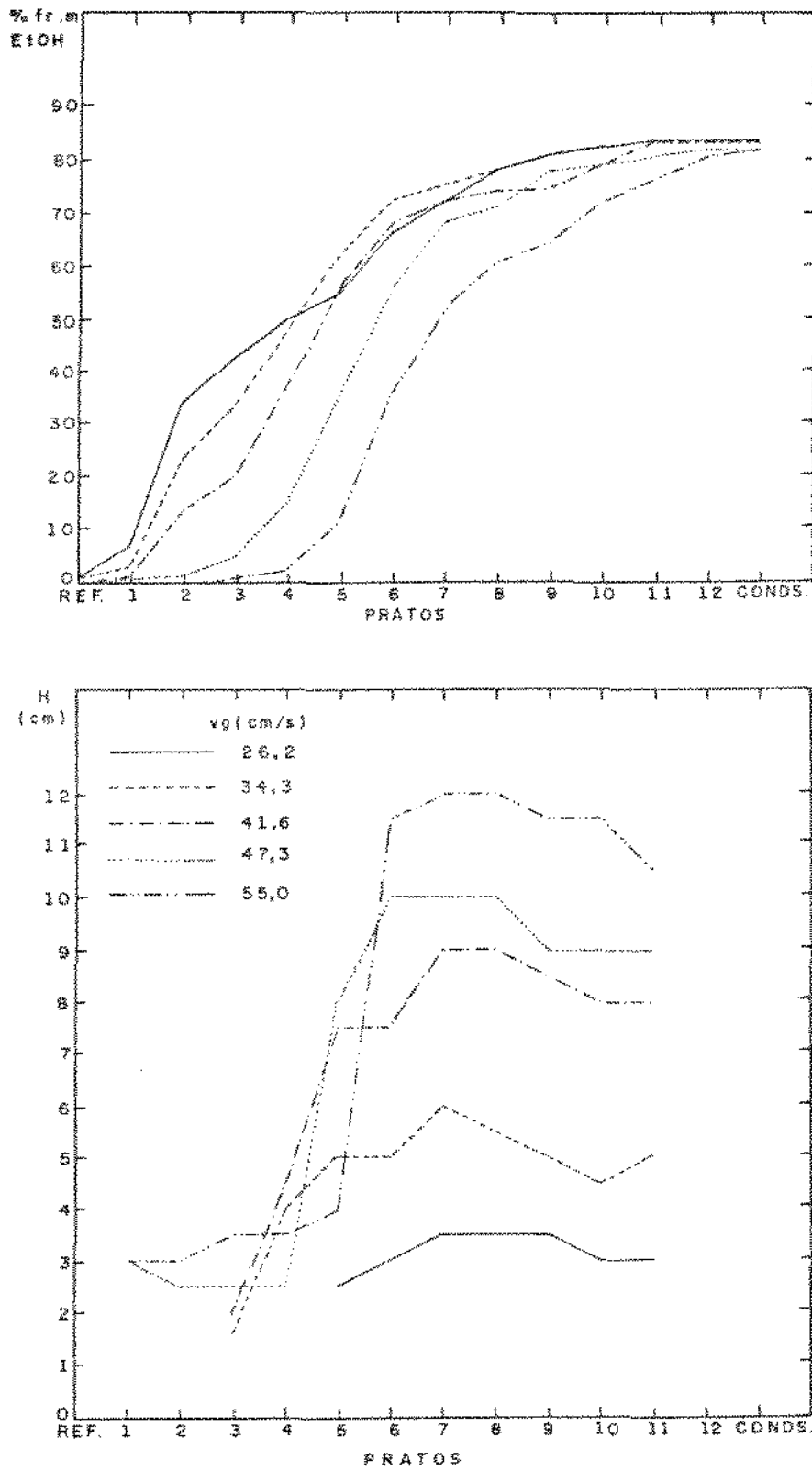


Figura 4.4.- Composições e Alturas da Dispersão nos Pratos da Coluna em Função de v_g .
 $\phi = 14,25\%$, Refluxo total.
 $\%EtOH$ Inicial no retervedor: 1,6% fr. m.

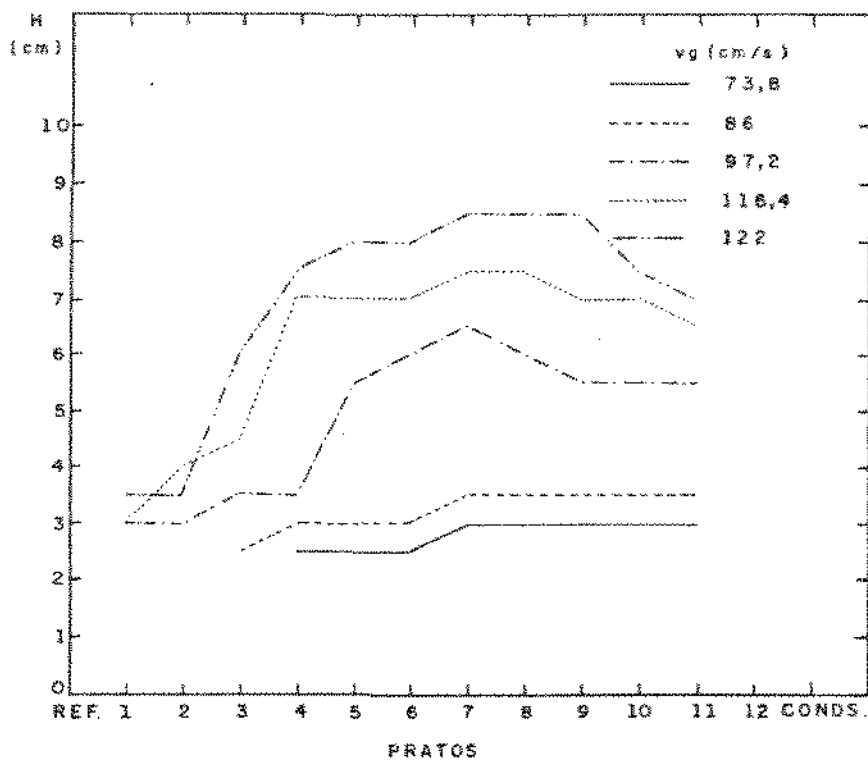
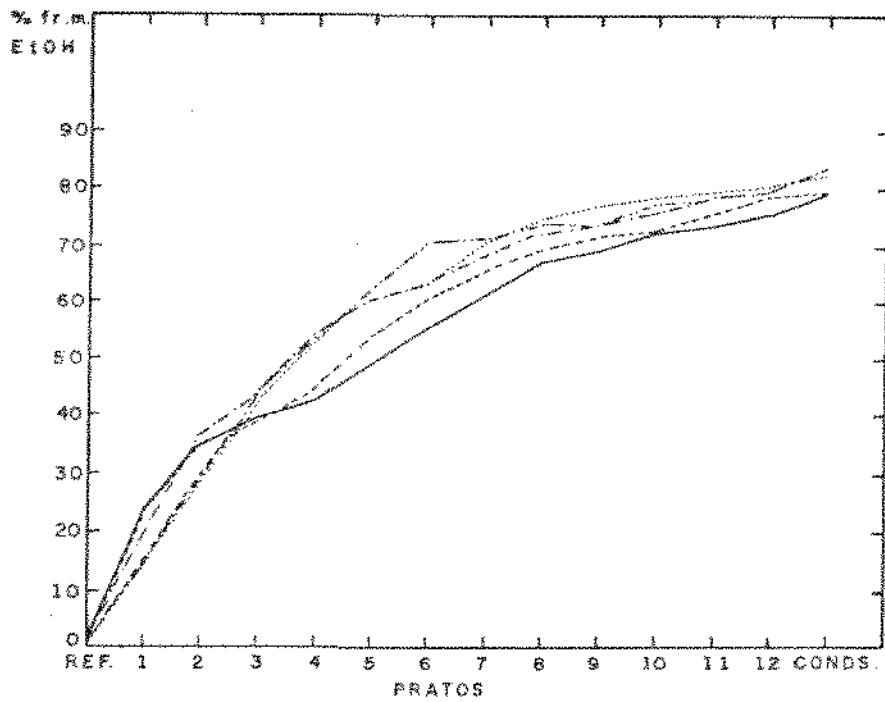


Figura 4.5.- Composições e Alturas da Dispersão nos Pratos da Coluna em Função de v_g .
 $\Phi = 33,47\%$, Refluxo total.
 *EtOH inicial no reservador: 3,00% fr. m.

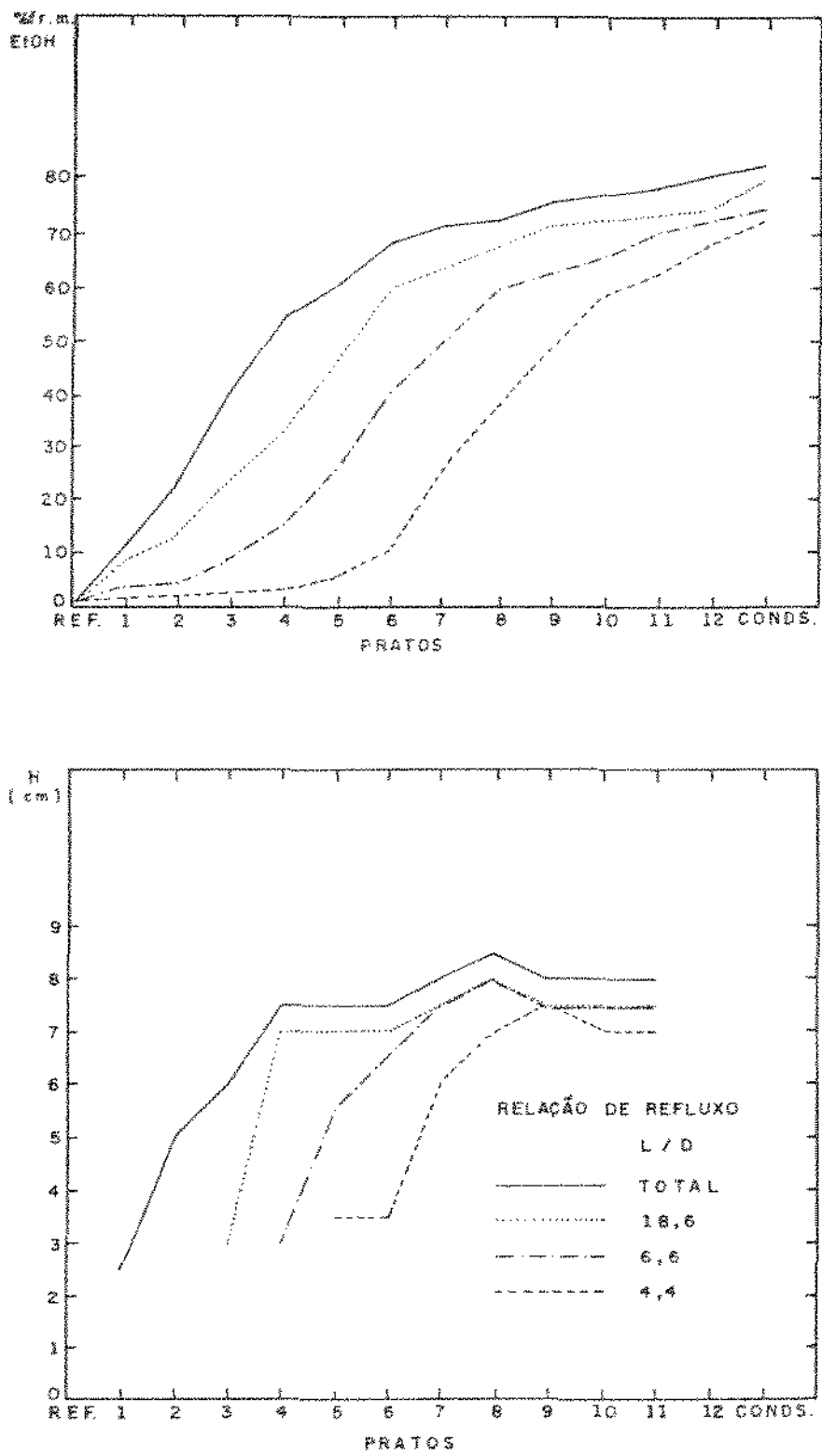


Figura 4.6.- Composições e Alturas da Dispersão nos Pratos da Coluna em Função da Relação de Refluxo utilizada.
 $\Phi = 36,28\%$
 x_{EtOH} inicial no reservador: 3,00% fr. m.

No ítem 2.4 da análise da literatura foram comentados os efeitos das propriedades físicas das fases sobre a altura da dispersão, o comportamento dos sistemas positivos, negativos e neutros em relação a estabilidade das bolhas e também as explicações para a estabilização das bolhas da dispersão em um sistema positivo.

O sistema etanol-água é identificado como positivo e portanto é espumante. Com aquelas informações sobre o comportamento de um sistema positivo, juntamente com a análise da variação da tensão superficial do sistema etanol-água (figura 4.7) onde se observa que os maiores gradientes de tensão superficial ocorrem nas concentrações mais baixas de etanol, era de se esperar que nos pratos inferiores ocorresse a formação de maiores quantidades da dispersão com bolhas estáveis, em função dos maiores gradientes de tensão superficial desenvolvidos. Porém as observações experimentais feitas não mostraram isto. Deve portanto existir um outro fator que necessita ser levado em consideração nos sistemas destilantes e que permita justificar aquelas observações. O outro fator será a variação da velocidade superficial ou da vazão volumétrica do líquido na coluna. A quase totalidade dos trabalhos publicados sobre o comportamento hidrodinâmico das colunas de pratos perfurados sem vertedores utilizaram um sistema do tipo líquido-gás inerte. Nestes casos a vazão do líquido permanece constante. Quando se passa a trabalhar com sistemas destilantes, onde a transferência de massa está presente nos dois sentidos, a vazão volumétrica pode variar significativamente de prato para prato. Esta variação é provocada pela mudança da concentração do líquido em cada prato e será tanto maior, para uma mesma

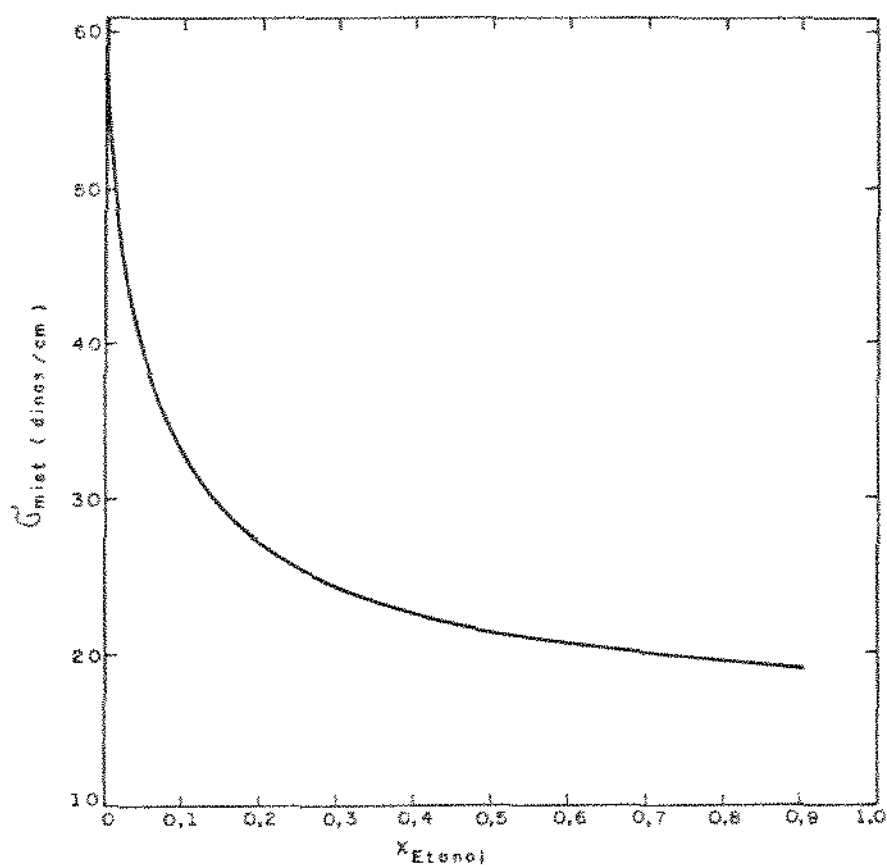


Figura 4.7.- Variação da Tensão Superficial da Mistura Etanol-Água com a Composição em Etanol, na Temperatura de Ebulição.

variação na concentração, quanto maior for a diferença entre os volumes molares no estado líquido dos componentes da mistura submetida à destilação. No sistema etanol-água a vazão volumétrica do líquido no prato da base pode diminuir para menos da metade da vazão no prato do topo.

De posse destas informações pode-se analisar melhor o comportamento da altura da dispersão descrito anteriormente nos pratos da coluna e ilustrados nos gráficos das figuras 4.4 até 4.6:

- Nos pratos que não apresentam dispersão, a vazão volumétrica do líquido ainda não é suficiente para que tenha início a sua retenção sobre eles para aquela velocidade de vapor indicada.

- A partir do momento em que aparece o primeiro prato com dispersão, verifica-se que a altura da dispersão cresce rapidamente nos pratos seguintes até que a concentração do líquido no prato alcance um valor que normalmente varia entre 0,4 e 0,6 em fração molar de etanol. Pelo gráfico da figura 4.7 isto se justifica, pois desde que exista uma vazão de líquido suficiente, é nesta região que ocorrem os maiores gradientes de tensão superficial que tendem a estabilizar as bolhas da dispersão. Deve-se lembrar ainda que a vazão volumétrica do líquido aumenta de prato em prato na direção do topo da coluna. Isto favorece ainda mais a formação de uma maior altura da dispersão.

- Para a concentração na faixa de 0,4 a 0,6 ou maiores em fração molar de etanol, verifica-se que a altura da dispersão tende a estabilizar e até a diminuir um pouco em alguns casos. Novamente pelo gráfico da figura 4.7 observa-se

que nesta faixa de concentração os gradientes de tensão superficial já são bastante pequenos. Além disto ocorre uma dificuldade crescente em conseguir gradientes de concentração razoáveis à medida que se vai aproximando do azeótropo e ZUIDERWEG e HARMENS (1958) em seus estudos sobre o efeito da tensão superficial, afirmam que quando a força motriz, propulsora da transferência de massa, é pequena, tendem a diminuir as diferenças de comportamento em relação ao efeito espumante entre os sistemas positivos e negativos. Os pequenos gradientes na tensão superficial tem maior dificuldade em manter a estabilidade das bolhas, justificando o máximo nas alturas das dispersões obtidos com as concentrações intermediárias de etanol. O aumento na vazão volumétrica de líquido nestes pratos, já é menor que nos pratos inferiores, e não consegue compensar a perda da estabilidade das bolhas devido aos pequenos gradientes de tensão superficial que se desenvolvem.

Resumindo, em sistemas destilantes a quantidade ou a altura da dispersão formada em cada prato, para uma mesma velocidade do vapor, depende tanto do valor da variação da tensão superficial desenvolvida no refluxo como da vazão volumétrica do líquido, que pode variar significativamente de prato para prato.

Com base nesta análise, é razoável supor que se possa operar um sistema positivo numa situação em que o perfil das alturas da dispersão se inverta, isto é, os pratos da base terão as maiores alturas de dispersão. Basta que o componente menos volátil tenha um volume molar no estado líquido razoavelmente maior que o componente mais volátil.

4.4.2.- Influência da Área Livre de Escoamento

Nas figuras 4.8 a 4.10 mostram-se as variações na altura da dispersão causadas pela variação na área livre bem como o perfil de composições correspondente. Comparando-se as regiões das curvas onde a altura se estabiliza, observa-se que a altura da dispersão decresce com o aumento da área livre, para uma velocidade do vapor constante. Isto pode ser justificado pela maior facilidade de drenagem de líquido apresentada pelos pratos com área livre maior. Como em cada figura a velocidade superficial do vapor é aproximadamente igual, a velocidade nos orifícios é menor nos pratos com área livre maior, oferecendo uma menor resistência a drenagem do líquido pelos orifícios.

4.4.3.- Influência da Concentração Inicial de Álcool no Refervedor

Nas figuras 4.11 a 4.13 apresenta-se o comportamento da altura da dispersão em função de diferentes concentrações iniciais de álcool no refervedor. Nestas figuras mantém-se constantes a velocidade do gás e a área livre de escoamento. A concentração inicial de álcool no refervedor foi variada para cada tipo de prato relacionado na tabela 3.1 e esta variação permite que se possa realizar experimentos com quantidades diferentes de álcool circulando na coluna para cada tipo de prato da tabela 3.1. Isto se consegue devido a maior volatilidade do etanol e se a concentração inicial no refervedor é aumenta-

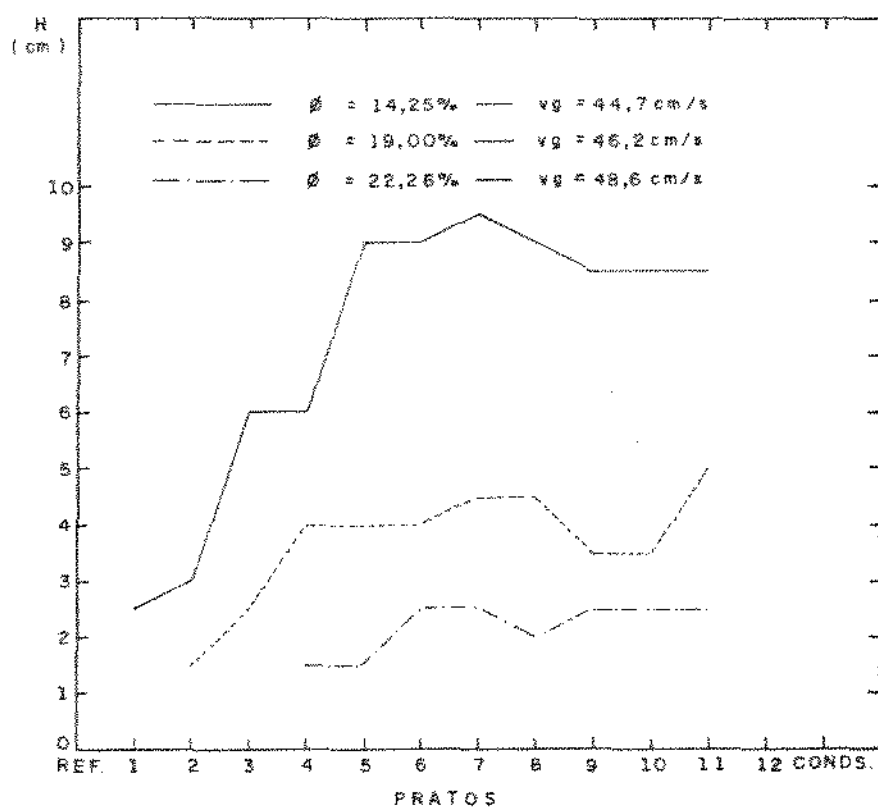
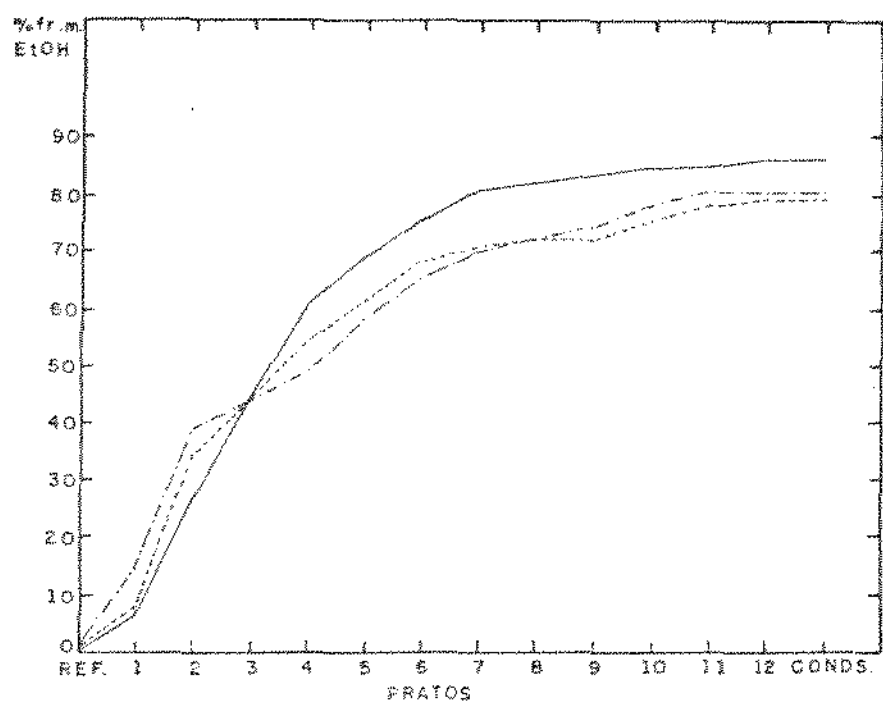


Figura 4.8.- Composições e Alturas da Dispersão nos Pratos da Coluna em Função da Área Livre.
 $\times$ EtOH inicial no refeedor: 2,3% fr. m.

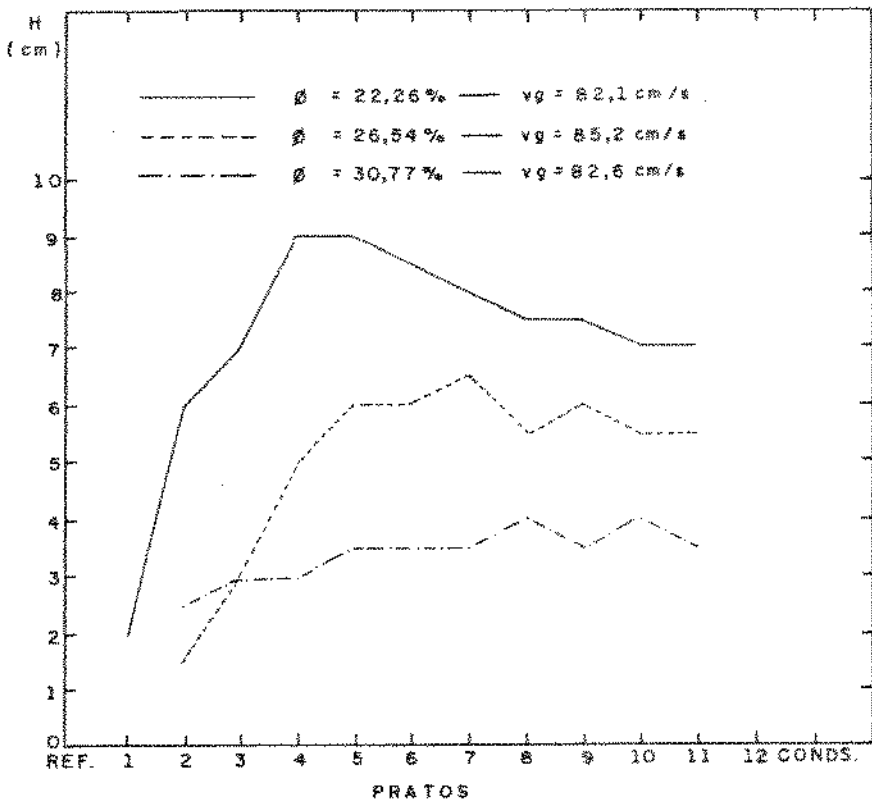
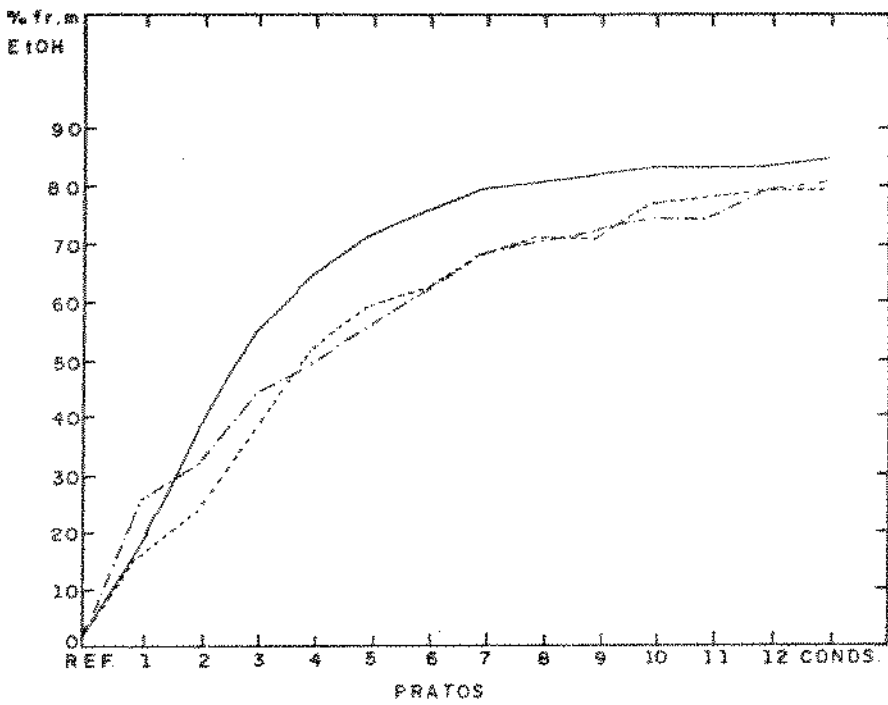


Figura 4.9.- Composições e Alturas da Dispersão nos Pratos em Função da Área Livre.
*EtOH inicial no reservador: 3,00% fr. m.

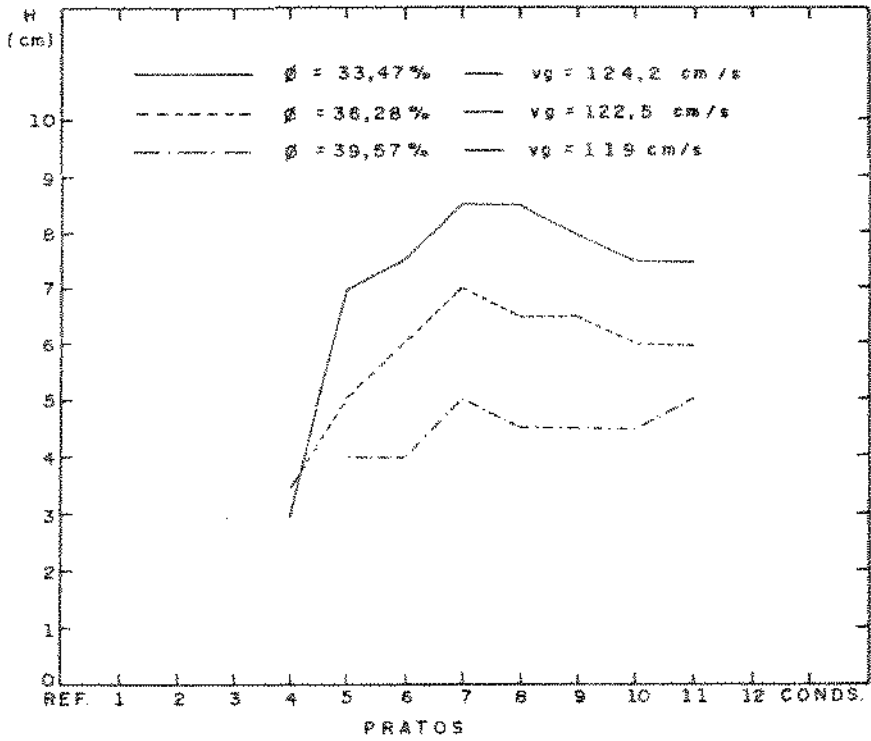
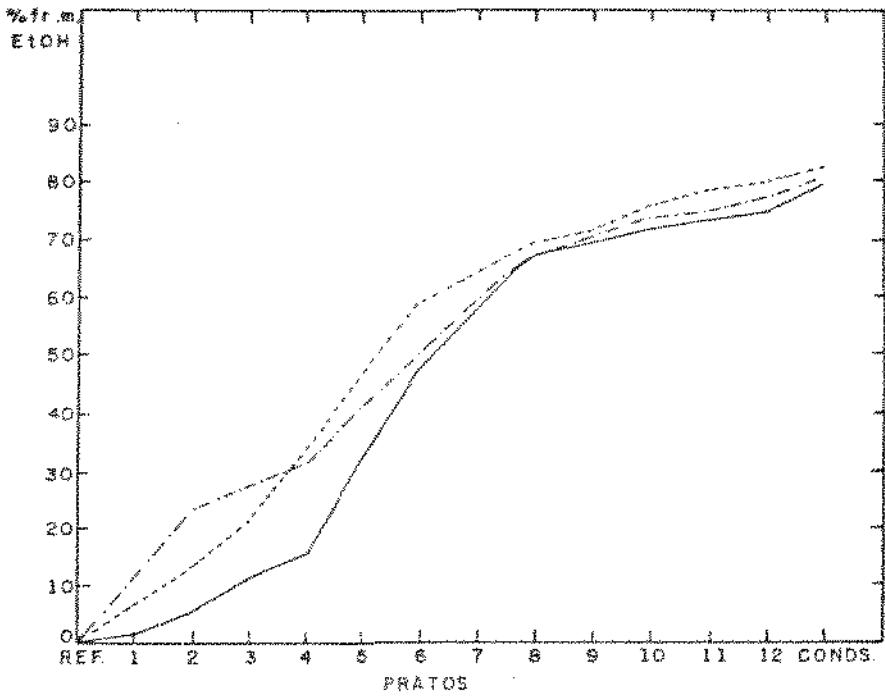


Figura 4.10.- Composições e Alturas da Dispersão nos Pratos em Função da Área Livre.
%EtOH inicial no reservador: 1,6%

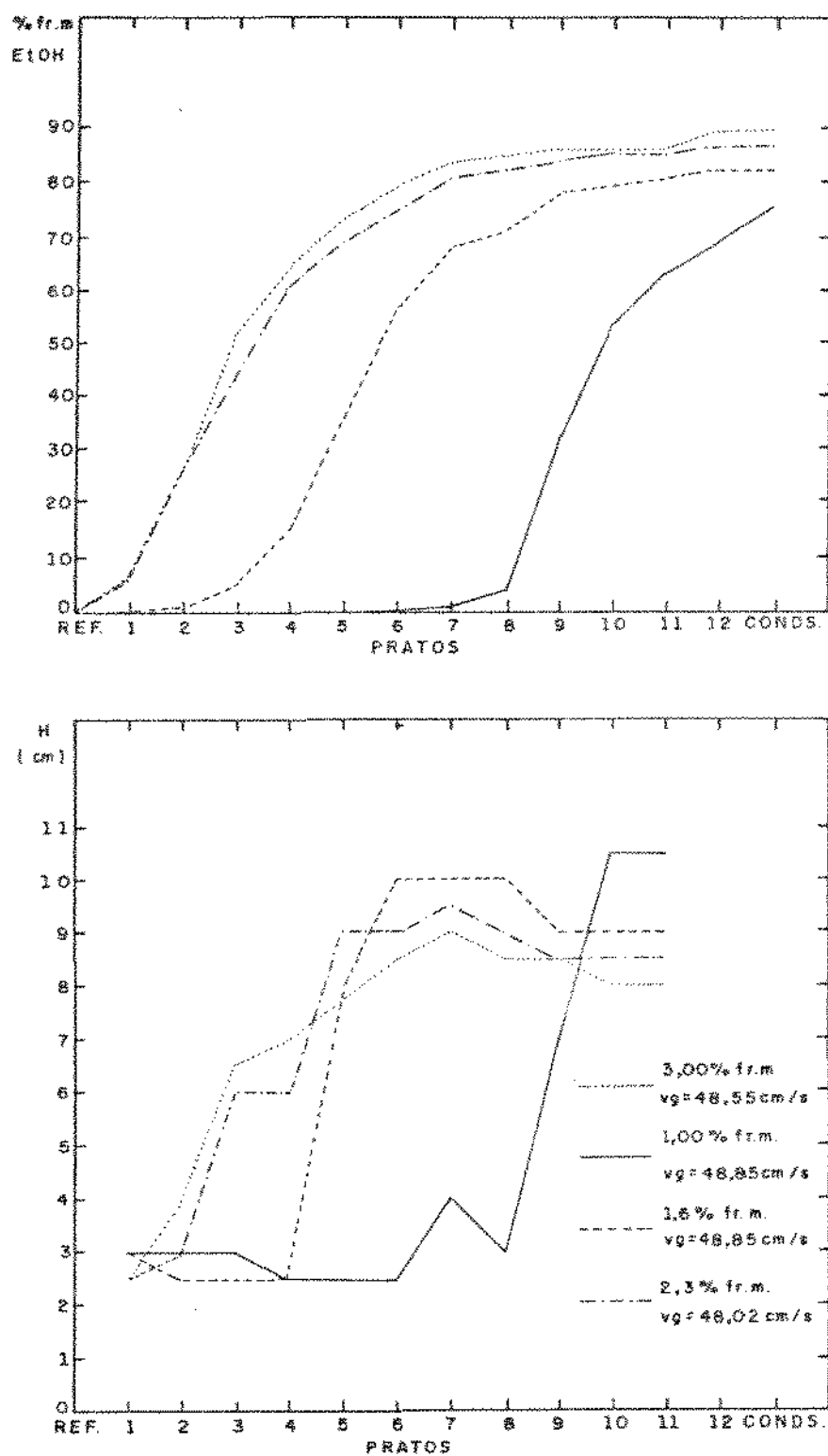


Figura 4.11.- Composições e Alturas da Dispersão nos Pratos da Coluna em Função da Concentração Inicial de Etanol no Reservador.
 $\Phi = 14,25\%$

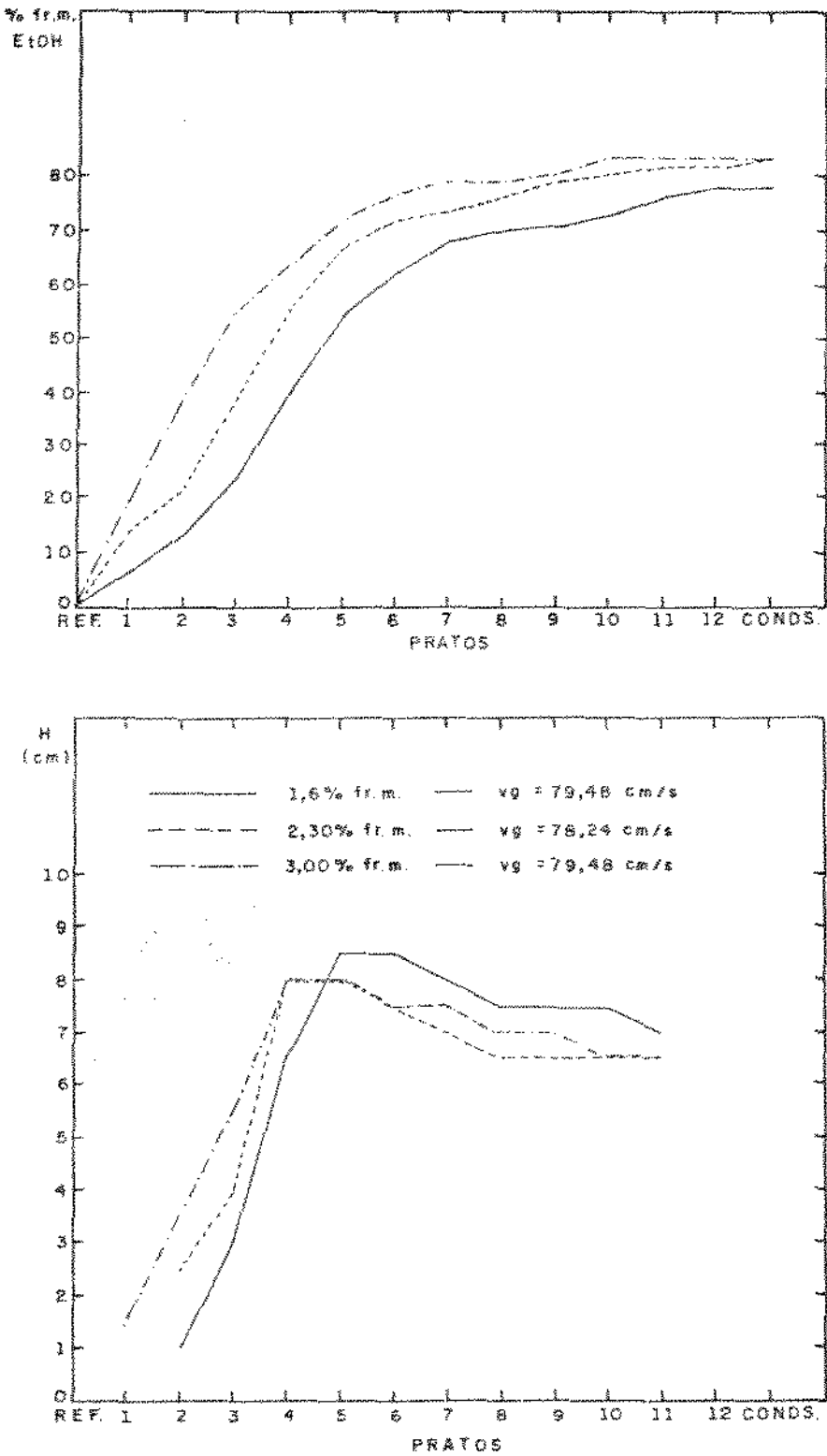


Figura 4.12.- Composições e Alturas da Dispersão nos Pratos da Coluna em Função da Concentração Inicial de Etanol no Reservador.
 $\Phi = 22,26\%$

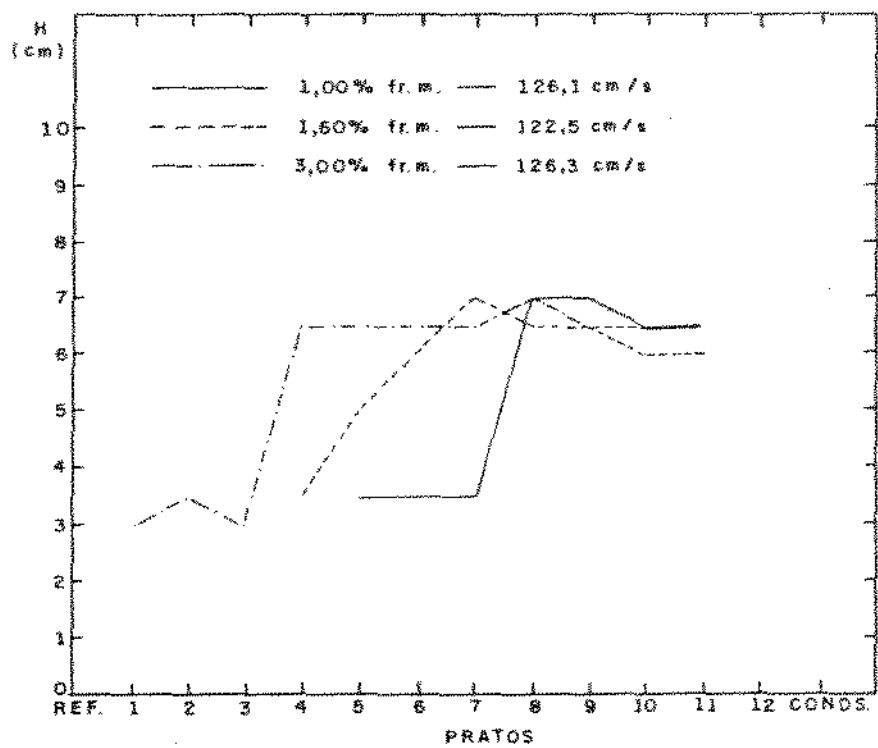
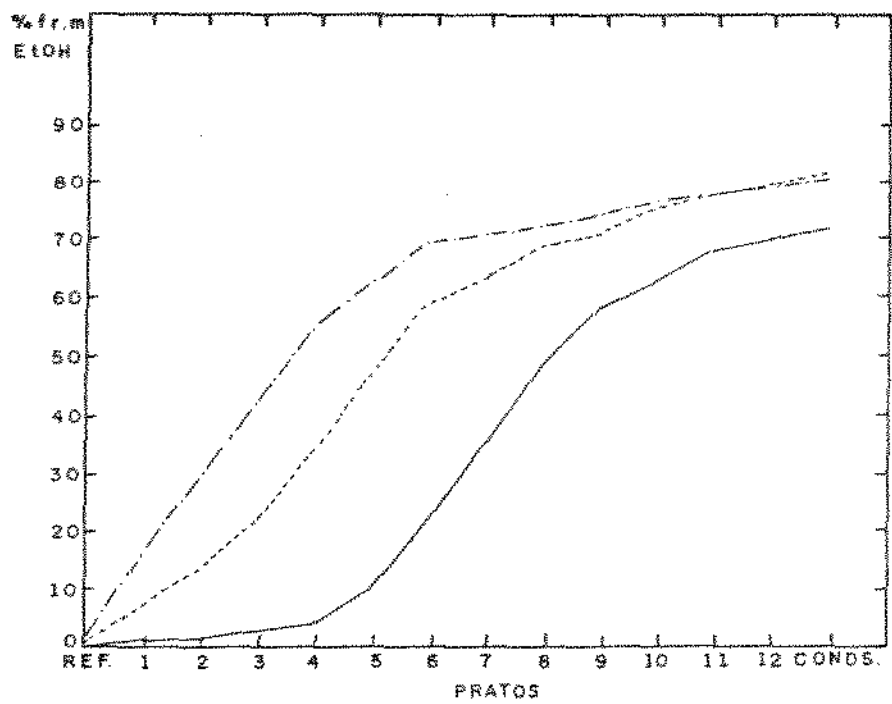


Figura 4.13.- Composições e Alturas da Dispersão nos Pratos da Coluna em Função da Concentração Inicial de Etanol no Refervedor.
 $\phi = 36,28\%$

da, quando a coluna atinge o estado estacionário, a fração volumétrica em etanol no líquido total que está circulando torna-se mais elevada. Observa-se nestas figuras que com o aumento da quantidade de álcool circulando pela coluna (maior concentração inicial no refeedor), os pratos inferiores apresentam progressivamente concentrações mais elevadas em etanol. Como em cada figura a área livre e a velocidade do vapor são constantes, o aumento da concentração nos pratos aumenta a vazão volumétrica do líquido conforme descrito no item 4.4.1. Assim, o aumento da quantidade de álcool que circula pela coluna faz com que a altura da dispersão seja maior nos pratos inferiores, o ponto em que a altura tende a se estabilizar é deslocado na direção dos pratos inferiores e diminui o número de pratos que operam abaixo do ponto de retenção de líquido. A partir do momento em que a altura da dispersão estabiliza, o valor que elas atingem é independente da quantidade de álcool circulando e isto acontece a partir de 0,4 a 0,6 em fração molar de etanol.

4.5.- PONTO DE RETENÇÃO DE LÍQUIDO

O limite inferior de operação de uma coluna de pratos perfurados sem vertedores é o ponto em que o líquido começa a ser retido sobre o prato pela ação resistiva do vapor. Este limite inferior é denominado o "ponto de retenção de líquido" e neste item é apresentada uma análise das condições nas quais ocorreram os pontos de retenção de líquido sobre os pratos. A

análise é realizada para todos os pratos relacionados na tabela 3.1 e operados em condições destilantes, tanto em refluxo total como em refluxo parcial. O procedimento experimental está descrito no capítulo 3.

No capítulo 2, item 2.5 é apresentada a descrição feita por RYLEK e STANDART (1964) das etapas que se sucedem até que se atinja o ponto de retenção utilizando um modelo hidráulico. No sistema destilante utilizado neste trabalho, as etapas que descrevem o aparecimento do ponto de retenção de líquido são as mesmas descritas por RYLEK e STANDART (1964).

Ao se operar com o sistema etanol-água não é possível atingir o ponto de retenção simultaneamente em todos os pratos da coluna. Os pratos que inicialmente operam no ponto de retenção são sempre os dois últimos ou então somente o do topo da coluna. Se a taxa de vaporização é aumentada, a retenção de líquido vai progredindo aos pratos inferiores, enquanto que os pratos anteriores iniciam a formação de espumas. Este fato é facilmente explicado devido a variação da vazão volumétrica de líquido ao longo da coluna e aos diferentes volumes molares da água e do etanol, conforme está detalhado no item 4.4.1.

Com o aumento da área livre de escoamento dos pratos, necessitam-se maiores velocidades de vapor e de líquido para manter o ponto de retenção.

Para uma mesma área livre de escoamento e uma mesma vazão volumétrica de líquido, observa-se que com o aumento da concentração em etanol, a velocidade superficial do vapor necessária para a retenção de líquido no prato diminui. Isto pode ser explicado pelo efeito favorável a formação de espuma promovido pelo etanol. As figuras 4.14 a 4.16 ilustram o que se expôs acima para três valores diferentes de área livre.

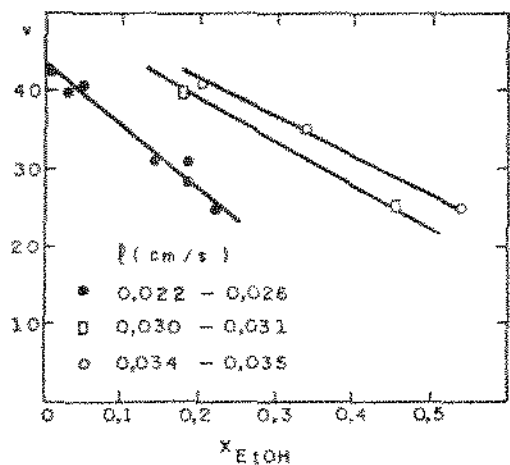


Figura 4.14
Pontos de Retenção
em Pratos com
 $\phi = 14,25\%$

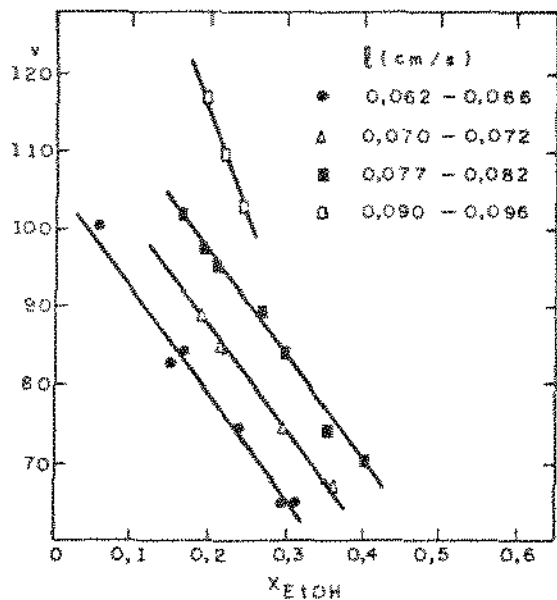


Figura 4.15.- Pontos de Retenção
em Pratos com
 $\phi = 26,54\%$

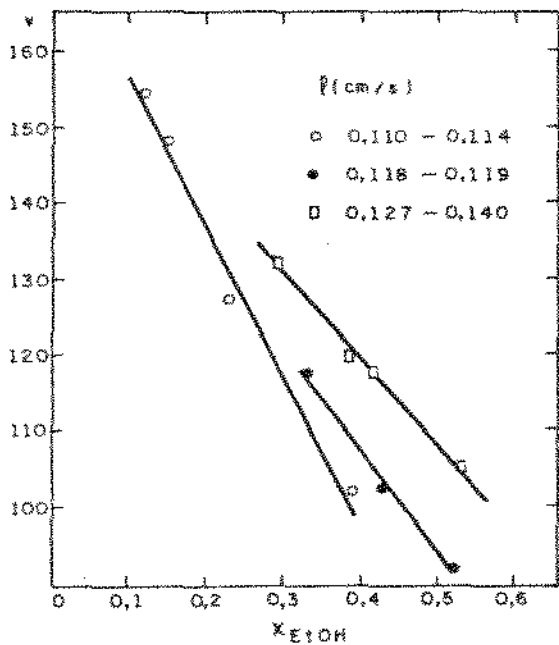


Figura 4.16.- Pontos de Retenção
em Pratos com
 $\phi = 39,57\%$

Para uma velocidade constante do vapor e uma mesma área livre de escoamento, à medida em que a concentração em etanol aumenta, torna-se necessária uma maior velocidade do líquido para que se atinja o ponto de retenção. Isto sugere mais uma vez a influência das propriedades físico-químicas da mistura.

Para uma mesma concentração de etanol e uma mesma área livre de escoamento, à medida em que a velocidade do vapor aumenta, a vazão do líquido no ponto de retenção também aumenta. A explicação para isto deve residir no fato de que se a velocidade do vapor aumenta é necessária uma vazão maior de líquido para conseguir bloquear todos os orifícios ao mesmo tempo.

4.6.- OSCILAÇÕES DA DISPERSÃO

As oscilações de meia onda e de onda completa descritas por BIDDULPH e STEPHENS (1974) não foram observadas em nenhum dos experimentos realizados neste trabalho. Observou-se no entanto que com o aumento da velocidade do vapor a dispersão iniciava um movimento de pulsação na vertical e que se acentuava como o aumento dessa velocidade. A não ocorrência das oscilações de meia onda e de onda completa nesta coluna pode ser explicada pelo seu diâmetro razoavelmente pequeno. Este diâmetro tende a estabilizar qualquer movimento da dispersão no sentido lateral e desta forma resta à dispersão o movimento na vertical para dar vazão a aumentos locais na porosidade.

Este fenômeno pode ser melhor ilustrado analisando-se o mecanismo de formação de ondas descrito por CERVENKA e KOLAR (1973): o gás penetra na dispersão gás-líquido no local de menor pressão aumentando a sua porosidade, transfere para a dispersão sua energia cinética e é responsável pelo movimento ascendente da dispersão. Simultaneamente outras porções da dispersão são "sugadas" das regiões vizinhas deste ponto do prato. Quando esta porção da dispersão alcança a superfície ela se desintegra e o líquido que se separa vai aumentando a pressão estática acima do ponto inicial do prato e também move-se para regiões vizinhas. O deslocamento de líquido de algumas regiões do prato para outras causa decréscimos da pressão naqueles pontos e desta forma permite a penetração de novas quantidades de gás enquanto que no ponto inicial do prato o líquido liberado pela desintegração da dispersão na superfície move-se para baixo na forma de uma dispersão de menor porosidade (maior densidade). Ao atingir o prato, sua energia cinética é transformada em energia de pressão, com uma parte do líquido "chorando" pelo orifício e outra parte se deslocando para regiões de menor pressão. Desta forma a pressão neste ponto diminui novamente e permite uma nova passagem de gás. Inicialmente os locais em que a dispersão se eleva e desce são alterados randomicamente. Aumentando-se a velocidade do gás provoca-se um aumento no gradiente de velocidade entre os locais de movimento ascendente e descendente da dispersão e conseqüentemente aumenta a distância entre eles. Se esta distância vai aumentando até atingir uma dimensão comparável ao diâmetro da coluna, então pode-se iniciar um movimento mais ou menos uniforme e que dará origem a oscilação de onda completa

(figura 2.10). Se esta distância se tornar igual ao dobro do diâmetro da coluna pode aparecer a oscilação de meia onda (figura 2.11).

O diâmetro da coluna utilizada neste trabalho não deve permitir a estabilização destes movimentos oscilatórios, pois provavelmente quando a distância entre os pontos de movimento ascendente atinge o valor do diâmetro da coluna, esta distância ainda não será a suficiente para que eles se tornem estáveis. Deve existir um diâmetro de coluna mínimo para cada uma destas oscilações, onde a oscilação de meia onda necessita de um diâmetro menor que a oscilação de onda completa.

4.7.- CONCLUSÃO

A análise dos resultados experimentais obtidos na operação da coluna de pratos perfurados sem vertedores utilizando o sistema etanol-água, permitiram descrever alguns aspectos do comportamento hidrodinâmico deste tipo de coluna. Descreveram-se os regimes de escoamento e suas características, a transição entre os regimes "spray" e "froth", o limite inferior de operação representado pelo ponto de retenção de líquido e, a altura da dispersão com os fatores que a influenciam. Como não se observaram as oscilações de meia onda é onda completa apresentaram-se os motivos que devem ter provocado este comportamento da dispersão.

CAPÍTULO - 5

M O D E L A G E M

5.1.- INTRODUÇÃO

Em engenharia existem vários processos de interesse e de natureza tão complicada que fazem com que a previsão dos fenômenos envolvidos, partindo unicamente de considerações dos fundamentos teóricos, não se torna prática. Nestes casos, uma técnica comumente empregada é analisar estes processos em pequena escala e agrupar as variáveis influentes no processo na forma de grupos adimensionais e assim generalizar a sua aplicação e permitir a extrapolação das instalações. Este método está baseado na teoria da análise dimensional.

O escoamento das fases líquida e vapor em uma coluna de pratos perfurados sem vertedores ocorre de forma intermitente pelos furos dos pratos, com uma agitação bastante intensa e a presença de pulsações e oscilações da dispersão. Desta forma é muito difícil descrever o comportamento hidrodinâmico das fases com um modelo simplificado. Assim sendo, neste trabalho a modelagem dos resultados experimentais será realizada utilizando a teoria da análise dimensional.

As correlações desenvolvidas neste capítulo permitirão prever o comportamento hidrodinâmico das dispersões e envolverão a previsão do ponto de retenção de líquido sobre o prato e que representa o seu limite inferior de operação, a altura da dispersão que se forma e a região de transição entre os regimes "spray" e "froth", em função das vazões e propriedades físico-químicas das fases e dos parâmetros geométricos dos pratos.

5.2.- ALTURA DA DISPERSÃO

Os motivos que justificam o estudo da altura que uma dispersão formada pela interação das fases irá atingir podem ser resumidos no seguinte: o tempo de contato entre as fases que reflete na eficiência de separação e a previsão do espaçamento necessário entre os pratos que necessita ser sempre maior que a altura da dispersão que se forma.

Das equações apresentadas na literatura, a grande maioria delas refere-se a estudos realizados em modelos hidráulicos e entre elas podem-se citar as seguintes: as equações (2.19) e (2.20) propostas por MAHENDRU e HACKL (1979) podem ser combinadas com a equação (2.18) e assim calcular a altura da dispersão formada. Os próprios autores citam porém, que a equação (2.19) foi obtida com o sistema água-ar o que recomenda apenas para sistemas pouco ou não espumantes enquanto que o sistema etanol-água é bastante espumante e estas equações não são recomendadas. CRUZ (1983) propôs as equações (2.21) e (2.22) que quando combinadas com a equação (2.18) resultam na equação (5.1) abaixo e que permite calcular a altura da dispersão:

$$H = \left[1 - 0,72 \cdot \left(\frac{v_g^2}{g \cdot h} \right)^{0,05} \cdot (\phi)^{0,03} \right]^{-1} \cdot h \quad (5.1)$$

A equação (5.1) resultou de experimentos realizados com os sistemas água-ar e solução aquosa de etanol-ar ensaiadas em uma coluna de pratos perfurados sem vertedores. Nestes experi-

mentos são empregados um sistema espumante (solução aquosa de etanol-ar) e um sistema não espumante (água-ar). Desta forma a equação (5.1) pode ser aplicada a sistemas espumantes ou não. Deve-se ressaltar apenas que os experimentos foram realizados em um modelo hidráulico e não em condições destilantes. Aplicando-se os resultados experimentais do presente trabalho na equação (5.1), encontrou-se um ajuste aceitável, sendo que o erro médio encontrado foi de 20,11%.

GIMENES (1986) propõe a equação (2.23) para o cálculo da altura da dispersão. A equação resultou de experimentos realizados com o sistema etanol-água submetido a destilação em uma coluna de pratos perfurados sem vertedores. Esta equação não será aqui analisada pois não apresenta resultados coerentes devido à não "adimensionalidade" de um de seus grupos, devendo ser corrigida segundo comunicação pessoal do seu autor.

Neste ítem do capítulo será proposta uma equação obtida com o auxílio da teoria dimensional e que deverá levar em conta, além dos efeitos de transferência de massa citados por GIMENES (1986), também a vazão volumétrica do líquido que varia de prato para prato conforme está descrito no ítem 4.4.1.

A altura da dispersão sobre um prato é função de uma série de variáveis e resumidamente são descritas da seguinte forma:

$$H = f(v_g, v_l, V, L, \rho_g, \rho_l, \mu_g, \mu_l, G_1, \Phi, d, T, q) \quad (5.2)$$

onde: v_g e v_l = velocidades superficiais (cm/s) do vapor e do líquido respectivamente; V e L = vazões molares (moles/s) do vapor e do líquido respectivamente; ρ_g e ρ_l = massa específica (g/cm³) do vapor e do líquido respectivamente; μ_g e μ_l = viscosidades dinâmicas (g/cm.s) das fases vapor e líquida respectivamente; σ_l = tensão superficial do líquido (dina/cm) Φ = área livre de escoamento (área dos orifícios/área total do prato); d e T = diâmetro do orifício (cm) e espessura (cm) do prato respectivamente; g = aceleração da gravidade (cm/s²)

Para se encontrar os grupos adimensionais utilizou-se o Teorema Pi de Buckingham e resultaram os seguintes grupos adimensionais:

$$\frac{L}{d \cdot \mu_l}, \frac{V}{d \cdot \mu_l}, \frac{v_g \cdot d \cdot \rho_g}{\mu_l}, \frac{v_l \cdot d \cdot \rho_l}{\mu_l}, \frac{\sigma_l}{\mu_l \cdot v_g}, \frac{g \cdot d}{v_g^2}, \frac{v_l}{v_g}, \frac{T}{d}, \frac{H}{d}, \frac{\mu_g}{\mu_l}, \Phi \quad (5.3)$$

Rearranjando estes grupos entre si obtém-se os grupos adimensionais abaixo:

$$\frac{v_g \cdot d \cdot \rho_g}{\mu_g}, \frac{v_l \cdot d \cdot \rho_l}{\mu_l}, \frac{\sigma_l}{\mu_l \cdot v_g}, \frac{g \cdot d}{v_g^2}, \frac{L}{V}, \frac{H}{T}, \Phi \quad (5.4)$$

onde os dois primeiros grupos representam o número de Reynolds para o vapor e para o líquido respectivamente, em função das velocidades superficiais e do diâmetro do orifício. Este número representa uma relação entre as forças de inércia e as de

atrito durante o escoamento. O terceiro grupo tem sido utilizado na literatura [CRUZ (1983)] para representar a influência das propriedades físico-químicas do líquido na formação da espuma, principalmente da tensão superficial. O quarto grupo representa o inverso do número de Froude, utilizando (d) como comprimento característico e que indica a relação entre as forças de inércia e as forças gravitacionais. O grupo (L/V) representa a relação de refluxo que está sendo utilizada e (ϕ) a área livre de escoamento dos pratos. Desta forma, nestes grupos adimensionais estão envolvidas as taxas de escoamento das duas fases, suas propriedades físico-químicas e os parâmetros geométricos dos pratos.

Escrevendo-se uma equação para o grupo que contém a altura da dispersão (H) em função dos demais grupos adimensionais da relação (5.4), na forma de um produto de potência desses grupos, obtém-se a equação (5.5):

$$\frac{H}{T} = A \cdot \left(\frac{g \cdot d}{v_g^2} \right)^B \cdot \left(\frac{L}{V} \right)^C \cdot \left(\frac{v_g \cdot d \cdot \rho_g}{\mu_g} \right)^D \cdot \left(\frac{v_l \cdot d \cdot \rho_l}{\mu_l} \right)^E \cdot \left(\frac{\sigma_l}{\mu_l \cdot v_g} \right)^F \cdot (\phi)^G \quad (5.5)$$

onde A, B, C, D, E, F e G são as constantes que deverão ser ajustadas.

Fazendo-se uma regressão linear múltipla dos resultados experimentais, utilizando o método dos mínimos quadrados, obtém-se os valores das constantes da equação (5.5) e resulta a seguinte equação:

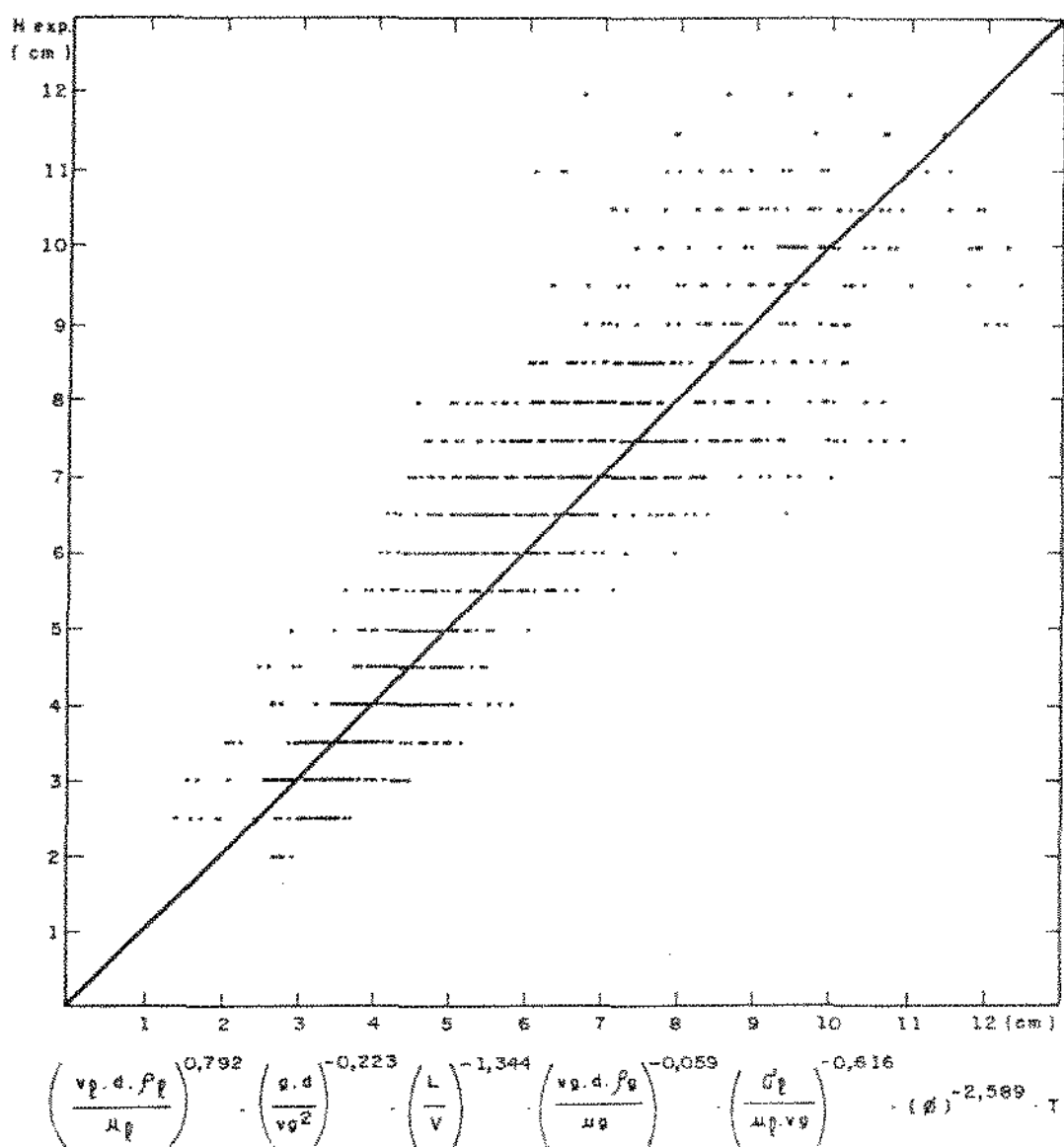


Figura 5.1.- Gráfico Comparativo entre a Altura da Dispersão Experimental e o Calculado com a Equação (5.6).

$$\frac{H}{T} = 1,0 \cdot \frac{\left(\frac{v_1 \cdot d \cdot \rho_1}{\mu_1} \right)^{0,792}}{\left(\frac{g \cdot d}{v_g^2} \right)^{0,227} \cdot \left(\frac{L}{V} \right)^{1,344} \cdot \left(\frac{v_g \cdot d \cdot \rho_g}{\mu_g} \right)^{0,059} \cdot \left(\frac{\rho_1}{\mu_1 \cdot v_g} \right)^{0,546} \cdot (\Phi)^{2,589}} \quad (5.6)$$

O erro médio obtido com esta equação quando aplicada aos resultados experimentais que apresentavam uma dispersão diferente do "spray" foi de 18,56%. O número de pontos experimentais utilizados foi de 1348. Na figura 5.1 apresentam-se os resultados experimentais versus os calculados com o auxílio da equação (5.6).

5.3.- PONTO DE RETENÇÃO DE LÍQUIDO

As equações apresentadas no item 2.5 para a previsão do ponto de retenção de líquido foram desenvolvidas partindo-se de resultados obtidos em modelos hidráulicos, sendo que somente a equação (2.30) apresentada por RYLEK et alii (1973) inclui também dados obtidos com um sistema líquido submetido a destilação. Os resultados encontrados com a equação (2.30) estão representados na figura 2.18 e é possível observar que o comportamento do sistema destilante difere do comportamento do modelo hidráulico, apresentando uma dispersão bem maior dos resultados. Nestas condições, será desenvolvida uma equação

que possa descrever melhor o ponto de retenção de líquido de sistemas submetidos a destilação e assim levar em conta os efeitos de transferência de massa e calor que não estão presentes nos experimentos com modelos hidráulicos.

Analisando os grupos adimensionais da equação (5.4), pode-se suprimir o grupo que contém a altura da dispersão (H), pois no ponto de retenção de líquido não existe dispersão formada sobre o prato. Isolando o grupo que contém a velocidade do líquido, isto permitirá que se possa encontrar qual a velocidade mínima do líquido necessária para se atingir o ponto de retenção em função dos demais fatores envolvidos, como os parâmetros geométricos dos pratos, as propriedades físico-químicas do sistema destilante e a relação de refluxo empregada. A equação pode ser representada da seguinte forma:

$$\frac{v_l \cdot d \cdot \rho_l}{\mu_l} = f \left(\frac{v_g \cdot d \cdot \rho_g}{\mu_g}, \frac{\sigma_l}{\mu_l \cdot v_g}, \frac{g \cdot d}{v_g^2}, \frac{L}{V}, (\Phi) \right) \quad (5.7)$$

Escrevendo-se a equação (5.7) na forma de um grupo de potências, obtém-se a equação (5.8):

$$\frac{v_l \cdot d \cdot \rho_l}{\mu_l} = A \cdot \left(\frac{g \cdot d}{v_g^2} \right)^B \cdot \left(\frac{L}{V} \right)^C \cdot \left(\frac{v_g \cdot d \cdot \rho_g}{\mu_g} \right)^D \cdot \left(\frac{\sigma_l}{\mu_l \cdot v_g} \right)^E \cdot (\Phi)^F \quad (5.8)$$

onde A, B, C, D, E e F são as constantes que deverão ser ajustadas.

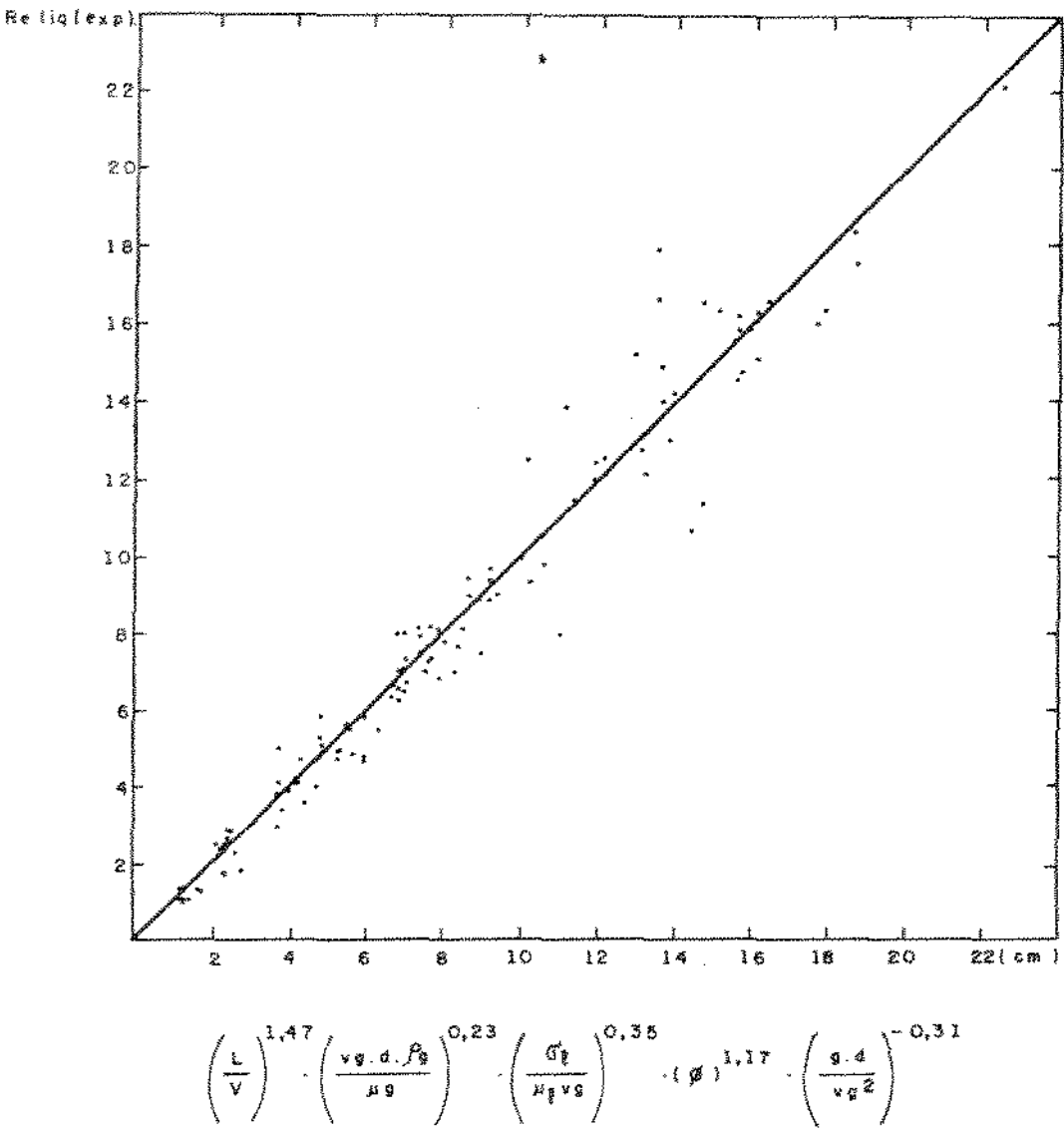


Figura 5.2.- Gráfico Comparativo entre o Re_l Experimental e o Calculado com a Equação (5.9), para o Ponto de Retenção de Líquido Sobre o Prato.

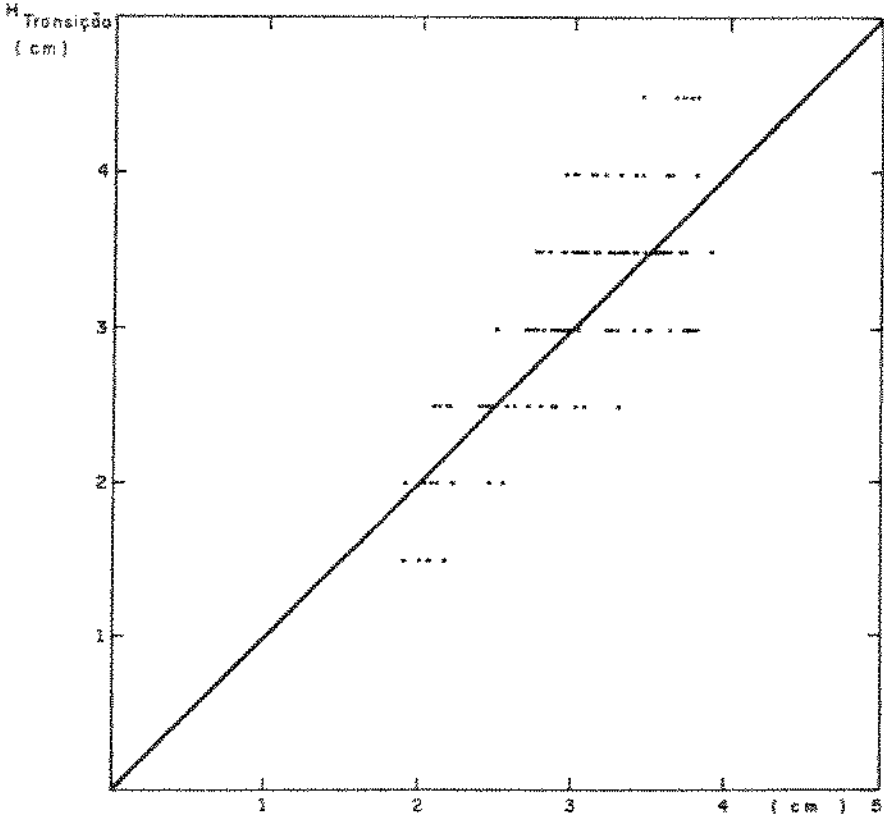
Aplicando-se o método dos mínimos quadrados aos resultados experimentais na forma dos grupos adimensionais, resulta a seguinte relação para a predição da velocidade crítica inferior da fase líquida:

$$\left(\frac{v_l \cdot d \cdot \rho_l}{\mu_l} \right)_{\text{crit.}} = \frac{\left(\frac{L}{V} \right)^{1,47} \cdot \left(\frac{v_g \cdot d \cdot \rho_g}{\mu_g} \right)^{0,27} \cdot \left(\frac{\sigma_l}{\mu_l \cdot v_g} \right)^{0,35} \cdot (\phi)^{1,47}}{\left(\frac{q \cdot d}{v_g^2} \right)^{0,34}} \quad (5.9)$$

A equação (5.9) aplicada aos 148 pontos experimentais apresentou um erro médio de 8,43%. Na figura 5.2 representam-se os resultados experimentais versus os calculados com o auxílio da equação (5.9).

5.4.- TRANSIÇÃO "FROTH-SPRAY"

Sobre o estudo da transição entre os regimes de escoamento do tipo "froth" e "spray" em pratos perfurados sem vertedores não é encontrada na análise da literatura já publicada, nenhuma referência em relação a este assunto. Todos os autores citados no item 2.3 deste trabalho estudaram esta transição em pratos perfurados com vertedores, onde os limites superiores da área livre empregada nos pratos são bem menores que o deste trabalho. Em razão disto, será desenvolvida uma



$$\left(\frac{g \cdot d}{v g^2}\right)^{0,05} \cdot \left(\frac{v g \cdot d \cdot \rho g}{\mu g}\right)^{0,447} \cdot \left(\frac{v g \cdot d \cdot \rho g}{\mu g}\right)^{0,01} \cdot \left(\frac{G g}{\mu g v g}\right)^{0,013} \cdot (\phi)^{0,234} \cdot \left(\frac{L}{V}\right)^{-0,69} \cdot \tau$$

Figura 5.3.- Gráfico Comparativo entre a Altura da Dispersão Experimental na Região de Transição "Froth-Spray" e o Calculado com a Equação (5.10).

equação que permita prever a ocorrência desta transição na operação com colunas de pratos perfurados sem vertedores.

Partindo da equação (5.2) obtemos a equação (5.5) que será utilizada para se obter a altura da dispersão na transição:

$$\left(\frac{H}{T}\right)_t = A \cdot \left(\frac{g \cdot d}{v_g^2}\right)^B \cdot \left(\frac{L}{V}\right)^C \cdot \left(\frac{v_g \cdot d \cdot \rho_g}{\mu_g}\right)^D \cdot \left(\frac{v_l \cdot d \cdot \rho_l}{\mu_l}\right)^E \cdot \left(\frac{\sigma_l}{\mu_l \cdot v_g}\right)^F \cdot (\Phi)^G \quad (5.5)$$

Fazendo-se uma regressão linear múltipla dos resultados experimentais, utilizando-se o método dos mínimos quadrados, encontram-se os novos coeficientes para a equação (5.5) e ela pode ser escrita da seguinte forma:

$$\left(\frac{H}{T}\right)_t = 1,0 \cdot \frac{\left(\frac{g \cdot d}{v_g^2}\right)^{0,05} \cdot \left(\frac{v_g \cdot d \cdot \rho_g}{\mu_g}\right)^{0,447} \cdot \left(\frac{v_l \cdot d \cdot \rho_l}{\mu_l}\right)^{0,04} \cdot \left(\frac{\sigma_l}{\mu_l \cdot v_g}\right)^{0,043} \cdot (\Phi)^{0,23}}{\left(\frac{L}{V}\right)^{0,69}} \quad (5.10)$$

A equação (5.10) aplicada aos 144 pontos experimentais apresentou um erro médio de 14,02% e eles estão representados na figura 5.3.

5.5.- CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentada as equações (5.6), (5.9) e (5.10) que permitem respectivamente a previsão da altura da dispersão, do ponto de retenção de líquido (limite inferior de operação do prato) e da altura da dispersão na transição "froth-spray" em colunas de pratos perfurados sem vertedores operando em condições destilantes, isto é, com ocorrência de transferência de massa e calor entre as fases líquida e vapor.

CAPÍTULO - 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.- CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho estudou-se o comportamento hidrodinâmico das fases líquida e vapor em uma coluna de pratos perfurados sem vertedores. A coluna utilizada, de 5,5 cm. de diâmetro interno, possuía doze estágios. A área livre de escoamento dos pratos da coluna era mantida constante numa mesma série de experimentos e no decorrer do trabalho foi variada de 9,89% até 39,57%, num total de nove valores diferentes. O sistema líquido utilizado foi o etanol-água operando em condições destilantes e em refluxo total e parcial. Os aspectos hidrodinâmicos estudados foram os regimes de escoamento e os tipos de dispersões formados, a transição entre os regimes "froth" e "spray", o limite inferior de operação dos pratos representado pelo ponto de retenção de líquido sobre eles, a altura e as oscilações da dispersão. Todos os itens foram estudados em função das vazões das duas fases, das suas propriedades físico-químicas e dos parâmetros geométricos dos pratos.

Em relação ao regime de escoamento observou-se que para os pratos com $\phi = 9,89\%$ até $19,0\%$ ocorreram os regimes "spray", espuma celular e "froth", enquanto que para os pratos com $\phi > 19,0\%$ ocorreram os regimes "spray" e "froth", sendo que nas maiores velocidades de vapor, utilizadas para cada tipo de prato, o regime "froth" apresentava uma acentuada presença de gotículas acima da dispersão. Esta presença de gotículas deverá ter uma influência significativa na diminuição da eficiência de separação.

Com o aumento da área livre de escoamento as vazões do vapor e do líquido empregadas também aumentam sem que a composição final do destilado seja muito afetada. Isto representa um fator muito positivo para este tipo de coluna de pratos, pois pode-se alcançar uma capacidade de produção mais elevada com um rendimento de separação praticamente equivalente aos pratos com área livre inferior.

A transição "froth-spray" em um mesmo experimento não ocorre simultaneamente em todos os pratos da coluna, mas sim nos pratos inferiores e/ou intermediários da coluna. Como a vazão volumétrica ou a velocidade superficial do líquido varia ao longo da coluna enquanto que a do gás é constante, quando a transição ocorria, isto sempre se dava numa vazão de líquido intermediária entre pratos operando no regime "spray" e "froth". Com base em grupos adimensionais característicos do sistema desenvolveu-se a equação (5.10) que permite prever a região da transição "froth-spray".

No estudo do limite inferior de operação dos pratos, representado pelo ponto em que o líquido começa a ficar retido, observou-se não ser possível operar com todos os pratos, de um mesmo experimento, nesta condição hidrodinâmica. Como o ponto de retenção de líquido ocorre nas velocidades críticas inferiores das duas fases, o principal motivo para que não se atinja a retenção simultaneamente em todos os pratos (quando eles possuem a mesma área livre de escoamento) reside na variação da vazão volumétrica ou da velocidade superficial do líquido, causada pelo perfil de composições da coluna, associada às diferenças nos volumes molares dos componentes puros. A equação (5.9), derivada da teoria da análise dimensional permite prever o ponto de retenção de líquido.

A altura da dispersão líquido-vapor além de ser influenciada pela geometria do prato e das propriedades físico-químicas das fases apresentou uma dependência muito grande em relação à velocidade superficial do líquido em cada estágio para uma velocidade superficial do vapor constante. A variação da vazão volumétrica de líquido nos estágios da coluna e sua influência na altura da dispersão sugere que se deva variar a geometria dos pratos em cada estágio da coluna e assim obter uma altura de dispersão constante sobre eles. A equação 5.6 permite prever a altura da dispersão em cada estágio.

No estudo das oscilações de meia onda e onda completa observou-se que elas não ocorreram na coluna utilizada nos experimentos. Isto pode ser explicado pelo diâmetro da coluna que não permitia a estabilização destes movimentos, sendo que a dispersão apresentava somente pulsações na vertical.

Ao término deste trabalho, surgem como sugestões para os próximos trabalhos os seguintes pontos:

- Montar a coluna com pratos em que a área livre de escoamento seja variável de um prato para outro, de modo a operar todos eles com uma mesma altura de dispersão e também que todos eles atinjam o ponto de retenção simultaneamente.

- Estudar o comportamento hidrodinâmico da coluna de pratos perfurados sem vertedores com sistemas negativos e neutros em relação a variação da tensão superficial.

- Numa coluna montada e operada de forma idêntica à deste trabalho, onde a altura da dispersão varia de prato para prato, procurar compensar a variação da vazão do líquido nos pratos inferiores, onde a altura da dispersão era sempre menor, pela injeção de líquido nas mesmas condições do prato e

verificar o comportamento da altura da dispersão nestas condições. Isto permitirá avaliar melhor a influência da tensão superficial na altura da dispersão, pois é nos pratos inferiores que seus gradientes são mais elevados.

- Um estudo relativo a transferência de massa neste tipo de coluna.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

7.- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- BAINBRIDGE, G.S., SAWISTOWSKI, H., "Surface Tension Effects in Sieve Plate Distillation Columns", Chem. Engng. Sci., V. 19, pp. 992-993, (1964).
- 2.- BIDDULPH, M. W., STEPHENS, D. J., "Oscillating Behaviour on Distillation Trays", AIChE J., V. 20, nº 1, pp. 60-67, (1974).
- 3.- BROKAW, R. S., "Predicting Transport Properties of Dilute Gases", Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., V. 8, pp. 240-253, (1969).
- 4.- CALDERBANK, P. H., RENNIE, J., "The Physical Properties of Foams and Froths Formed on Sieve Plates", Trans. I. Chem. E., V. 40, nº 1, pp. 3-12, (1962).
- 5.- CERVENKA, J., KOLAR, V., "Hydrodynamics of Plate Columns. X.- Analysis of Operation of Sieve Plates Without Downcomers", Coll. Czech. Chem. Commun., V. 38, pp. 3749-3761, (1973).
- 6.- CRUZ, S. L., "Dispersões Gás-Líquido em Pratos Perfurados sem Vertedor", Tese de Mestrado, Unicamp, (1983).
- 7.- FANE, A., SAWISTOWSKI, H., "Surface Tension Effects in Sieve-Plate Distillation", Chem. Engng. Sci., Vol. 23, pp. 943-945, (1968).
- 8.- GIMENES, M. L., "Estudo de uma Coluna de Destilação com Pratos Perfurados sem Vertedores", Tese de Mestrado, Unicamp, (1986).

- 9.- GMEHHLING, J., ONKEN, U., "Vapour-Liquid Equilibrium Data Collection", Dechema Chemistry Data Series, V. 1, part 1, (1977).
- 10.- HAKIN, D. I., STEINBERG, D., STIEL, L. I., "Generalized Relationship for the Surface Tension of Polar Fluids", Ind. Eng. Chem. Fund., V. 10, pp. 174-175, (1971).
- 11.- HOFHUIS, P. A. M., ZUIDERWEG, F. J., "Sieve Plates: Dispersion Density and Flow Regimes", I. Chem. E. Symp. Series n° 56, pp. 2.2/1-2.2/26, (1979).
- 12.- KING, C. J., "Procesos de Separación", Editorial Reverté S.A., Barcelona, (1980).
- 13.- LOCKETT, M. J., "The Froth to Spray Transition on Sieve Trays", Trans. I. Chem. E., V. 59, pp. 26-34, (1981).
- 14.- MAHENDRU, H.L., HACKL, A., "Contribution to the Design of Sieve Trays Without Downcomers", I. Chem. E. Symp. Series, n° 56, pp. 3.2/35-3.2/45, (1979).
- 15.- MISRA, B. N., VARSHNI, Y. P., "Viscosity-Temperature Relation for Solutions", J. Chem. and Engng. Data, V. 6, n° 2, pp. 194-196, (1961).
- 16.- MIYAHADA, T., TAKAHASHI, T., "Transition from Froth to Spray on Perforated Plates", J. Chem. Engng. Japan, V. 17, n° 2, pp. 211-214, (1984).
- 17.- PAYNE, G. J., PRINCE, R. G. H., "The Relationship Between the Froth and Spray Regimes, and the Orifice Processes Occurring on Perforated Distillation Plates", Trans. I. Chem. E., V. 55, pp. 266-273, (1977).
- 18.- PINCZEWSKI, W. V., FELL, C. J. D., "Droplet Sizes on Sieve Plates Operating in the Spray Regime", Trans. I. Chem. E., V. 55, pp. 46-52, (1977).

- 19.- PINCZEWSKI, W. V., FELL, C. J. D., "Nature of the Two-Phase Dispersion on Sieve Plates Operating in the Spray Regime", Trans. I. Chem. E., V. 52, pp. 294-299, (1974)
- 20.- PINCZEWSKI, W. V., FELL, C.J.D., "The Transition From Froth-to-Spray Regime on Commercially Loaded Sieve Trays", Trans. I. Chem. E., V. 50, pp. 102-108, (1972).
- 21.- PORTER, K. E., SAFEKOURDI, A., LOCKETT, M. J., "Plate Efficiency in the Spray Regime", Trans. I. Chem. E., V. 55, pp. 190-195, (1977).
- 22.- PORTER, K. E., WONG, P. F. V., "Citado no nº 29", I. Chem. E. Symp. Series nº 32, V. 2, p. 22, (1969).
- 23.- POZIN, M. E., MUKHLENOV, I. P., TARAT, E. Y., "Citado no nº 29", Zh. Prikl. Khim., V. 30, nº 1, p. 45, (1957).
- 24.- PRINCE, R. G. H., JONES, A. P., PANIC, R. J., "The Froth Spray Transition", I. Chem. E. Symp. Series nº 56, pp. 2.2/27-2.2/39, (1979).
- 25.- RAPER, J. A., PINCZEWSKI, W. V., FELL, C. J. D., "Liquid Passage on Sieve Trays Operating in the Spray Regime", Chem. Eng. Res. Des., V.62, pp.111-116, (1984).
- 26.- REID, R. C., PRAUSNITZ, J. M., SHERWOOD, T. K., "The Properties of Gases and Liquids, 3rd ed., Ed. McGraw Hill, USA, (1977).
- 27.- RENNIE, J., EVANS, F., "Citado no nº 34", Brit. Chem. Engng., V. 7, p. 498, (1962).
- 28.- RYLEK, M., KASTANEK, F., BRAUN, V., AUDY, R., "Lower Critical Gas and Liquid Velocities of Grid Trays", Coll. Czech. Chem. Comm., V. 38, pp. 181-184, (1973).
- 29.- RYLEK, M., STANDART, G., "The Hydraulics of Sieve Trays", I. Chem. Engng., V. 4, nº 4, pp. 711-747, (1964).

- 30.- SHARMA, M. M., GUPTA, R. K., "Mass Transfer Characteristics of Plate Columns Without Downcomer", Trans. I. Chem. E., V. 45, pp. T169-T175, (1967).
- 31.- SHOUKRY, F., CERMAK, J., KOLAR, V., "On the Hidrodynamics of Sieve Plates Without Downcomers. I.) Dynamic Nature of the Gas-Liquid Dispersion", The Chem. Eng. J., V. 8, pp. 27-40, (1974).
- 32.- TAKAHASHI, T., AKAGI, Y., KISHIMOTO, T., "Gas and Liquid Velocities at Incipient Liquid Stagnation on a Sieve Tray", I. Chem. Engng., V. 19, n° 1, pp. 113-118, (1979).
- 33.- TAMURA, M., KURATA, M., ODANI, H., "Practical Method for Estimating Surface Tensions of Solutions", Bull. Chem. Soc. Jpn., V. 28, pp. 83-88, (1955).
- 34.- THOROGOOD, R., "Dynamic and Qualitative Aspects of Distillation Theory", Brit. Chem. Engng., V. 8, n° 5, pp. 328-331, (1963).
- 35.- TSONOPOULOS, C., "An Empirical Correlation of Second Virial Coefficients", AIChE J. V. 20, n° 2, pp. 263-271, (1974).
- 36.- VALENTIN, F. H. H., "Absorption in Gas-Liquid Dispersions: Some Aspects of Bubble Technology", 1st ed., SPON'S Chemical Eng. Series, E.&F.N. Spon LTD, London, (1967).
- 37.- VARGAFTIK, N. B., "Tables on the Thermophysical Properties of Liquids and Gases", 2nd ed., John Wiley & Sons. Inc., (1975).
- 38.- VIVIAN, J. E., KING, C. J., "Absorption and Distillation", Reinhold Publishing Corporation, New York, (1963).
- 39.- WILKE, C. R., "A Viscosity Equation for Gas Mixtures", J. Chem. Phys., V. 18, pp. 517-519, (1950).

- 40.- WONG, P. F. Y., KWAN, W. K., "A Generalized Method for Predicting the Spray-Bubbling Transition on Sieve Plates", Trans. I. Chem. E., V. 57, pp. 205-209, (1979).
- 41.- ZELINSKI, Y. G., KAFAROV, V. V., "Hydrodynamic Conditions on Open-Grid (Turbogrid) Trays", I. Chem. Engng., V. 1, n° 1, pp. 74-79, (1961).
- 42.- ZUIDERWEG, F. J., HARMENS, A., "The Influence of Surface Phenomena on the Performance of Distillation Columns", Chem. Eng. Sci., V.9, n° 2/3, pp.89-103, (1958).

A P P E N D I C E S

APÊNDICE A

CÁLCULO DA FRAÇÃO MOLAR DO VAPOR A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA FASE LÍQUIDA (em fração molar)

As equações abaixo representam o ajuste dos dados experimentais para a curva de equilíbrio do sistema etanol-água, publicados em GMEHLING e ONKEN (1977). Eles se referem a pressão de 1 atm e as frações molares referem-se ao etanol.

Para $0 < x_a \leq 0,040$

$$y_a = -0,004887 + 13,3144.x_a - 320,366.x_a^2 + 7523,97.x_a^3 - 80622,5.x_a^4 \quad (A.1)$$

$$DMA = 0,00073$$

Para $0,040 < x_a \leq 0,155$

$$y_a = 0,14397 + 4,38826.x_a - 16,5043.x_a^2 + 19,8641.x_a^3 \quad (A.2)$$

$$DMA = 0,00076$$

Para $0,155 < x_a \leq 0,890$

$$y_a = 0,389626 + 0,963017.x_a - 1,75672.x_a^2 + 2,10234.x_a^3 - 0,717424.x_a^4 \quad (A.3)$$

$$DMA = 0,00127$$

onde: x_a e y_a = composição em fração molar das fases líquida e vapor

DMA = desvio médio absoluto

Estas equações estão no programa DADOS.BAS na subrotina da linha 12000.

APÊNDICE B
CÁLCULO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO
DA FASE LÍQUIDA

As equações abaixo representam o ajuste dos dados experimentais para a curva de equilíbrio do sistema etanol-água, publica os em GMEHLING e ONKEN (1977). Eles se referem a pressão de 1 atm e as frações molares referem-se ao etanol.

Para $0 < x_a \leq 0,040$

$$T_c = 99,8893 - 128,245.x_a - 6833,03.x_a^2 + 112678.x_a^3 \quad (B.1)$$

$$DMA = 0,023$$

Para $0,040 < x_a \leq 0,155$

$$T_c = 96,6233 - 172,591.x_a + 851,531.x_a^2 - 1673,79.x_a^3 \quad (B.2)$$

$$DMA = 0,021$$

Para $0,155 < x_a \leq 0,890$

$$T_c = 87,1536 - 26,2232.x_a + 30,3984.x_a^2 - 13,9041.x_a^3 \quad (B.3)$$

$$DMA = 0,047$$

onde: T_c = temperatura em °C

x_a = composição em fração molar da fase líquida

DMA = desvio médio absoluto

Estas relações estão no programa DADOS.BAS na subrotina da linha 11000.

APÊNDICE C

CÁLCULO DA TENSÃO SUPERFICIAL DO SISTEMA ETANOL-ÁGUA

Para o cálculo da tensão superficial da mistura etanol-água utilizou-se a correlação proposta por Tamura e colaboradores (1955) conforme descrito em REID et alii (1977). Neste método utilizam-se as tensões superficiais dos componentes puros e para a sua estimativa utilizou-se o método proposto por Hakin e colaboradores (1971) que entre outros parâmetros, utiliza o fator polar de Stiel e assim permite o cálculo da tensão superficial de líquidos polares. As equações referentes a estes cálculos estão relacionados no programa DADOS. BAS na subrotina da linha 15000. A figura 4.7 apresenta o gráfico da tensão superficial da mistura no ponto de ebulição em função da fração molar do etanol.

APÊNDICE D
CÁLCULO DA VISCOSIDADE DO SISTEMA ETANOL-ÁGUA
NO ESTADO LÍQUIDO

VARGAFTIK (1975) apresenta uma tabela de dados experimentais da viscosidade da mistura etanol-água. Porém a tabela apresenta viscosidades para temperaturas até 80 °C nas concentrações até 60% em peso de etanol e para temperaturas até 70 °C nas concentrações de 70 a 100% em peso de etanol. Como a faixa de temperatura em que a coluna opera se situa no intervalo aproximado de 80 a 100 °C optou-se por uma extrapolação dos dados publicados em VARGAFTIK (1975) para a faixa de operação da coluna.

MISRA e VARSHNI (1961) apresentam a seguinte correlação para o cálculo da viscosidade de soluções e entre elas a mistura etanol-água:

$$\log_{10}(\mu_1) = \alpha + \beta/T_k + \delta/T_k^2 \quad (D.1)$$

onde: μ_1 = viscosidade dinâmica do líquido (cP)

α , β e δ são constantes para uma dada concentração.

T_k = temperatura em K.

A partir da equação (D.1) determinaram-se viscosidades que permitiram encontrar uma equação que calcula a viscosidade do líquido saturado em função da composição. A equação obtida é a seguinte:

$$\mu_1 = 0,281164 + 2,9023.xa - 9,13532.xa^2 \quad (D.2) \\ + 11,206.xa^3 - 4,57668.xa^4 - 0,353117.xa^5$$

onde: μ_1 = viscosidade da mistura etanol-água em cP
 xa = composição molar em etanol da fase líquida

O cálculo da viscosidade está no programa DADOS.BAS
na subrotina da linha 16000.

APÊNDICE E

CÁLCULO DA VISCOSIDADE DA MISTURA NA FASE GASOSA

REID e colaboradores (1977) apresentam uma equação desenvolvida por Wilke (1950). Neste método utilizam-se as viscosidades dos componentes puros e para a determinação destas viscosidades utilizou-se uma equação derivada da teoria cinética de Chapman-Enskog, que normalmente é empregada quando ocorre atração ou repulsão entre moléculas em função de forças intermoleculares. Nesta equação aparece um termo denominado integral de colisão. A integral de colisão originalmente é baseada no potencial de Lennard-Jones e para permitir o cálculo da integral de colisão para moléculas polares, Brokaw (1969) apresenta uma equação que utiliza o potencial de Stockmayer e é esta a integral de colisão utilizada nos cálculos deste trabalho.

As equações envolvidas nestes cálculos estão apresentadas no programa GRUPDS.BAS.

APÊNDICE F

CÁLCULO DA MASSA ESPECÍFICA DAS FASES

a) A massa específica da fase líquida saturada foi calculada pela relação ponderada das densidades dos componentes puros representada pela equação (F.1):

$$\rho_l = x_p \cdot 0,7365 + (1-x_p) \cdot \rho_{\text{água}}(T_c) \quad (\text{F.1})$$

$$\text{onde: } \rho_{\text{água}}(T_c) = 1,0251 - 0,00066 \cdot T_c$$

$$T_c = \text{temperatura } (^{\circ}\text{C})$$

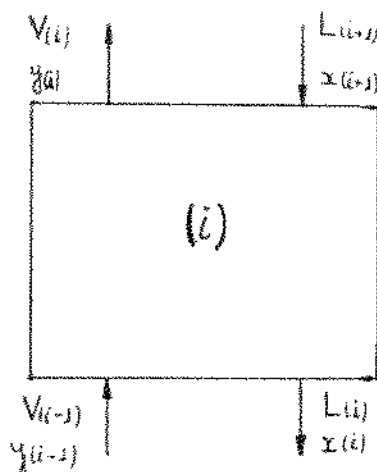
b) A massa específica da fase vapor: foi calculada com a utilização da equação do virial truncada no segundo membro para o cálculo do volume molar da mistura. O cálculo do 2º coeficiente da equação do virial foi feito utilizando-se a Correlação de Tsonopoulos (1974) para componentes que formam pontes de hidrogênio. Com o volume molar da mistura gasosa e a sua massa molecular média, calculou-se então a sua massa específica.

As equações envolvidas nos cálculos estão representadas no programa DADOS.BAS, onde para a massa específica da fase líquida utiliza-se a subrotina da linha 13000 enquanto que para a massa específica da fase gasosa utiliza-se a subrotina da linha 14000.

APÊNDICE G

CÁLCULO DAS VAZÕES DAS FASES EM CADA ESTÁGIO

a) Operação em refluxo total:



Utilizam-se as seguintes considerações: a coluna é adiabática, a mistura das fases é perfeita em cada estágio e o condensador é total.

BALANÇO DE MASSA GLOBAL APLICADO AO ESTÁGIO (i):

$$V_{(i-1)} + L_{(i+1)} = V_{(i)} + L_{(i)} \quad (I)$$

Na condição de refluxo total e considerando (i) como o prato de topo, sabe-se que:

$$V_{(i)} = L_{(i+1)} \quad (II)$$

Aplicando-se (II) em (I):

$$V_{(i-1)} = L_{(i)} \quad (III)$$

BALANÇO DE MASSA APLICADO A UM COMPONENTE:

$$V_{(i-1)} \cdot y_{(i-1)} + L_{(i+1)} \cdot x_{(i+1)} = V_{(i)} \cdot y_{(i)} + L_{(i)} \cdot x_{(i)} \quad (IV)$$

Na condição de refluxo total e considerando-se (1) como o prato de topo, sabe-se que:

$$y_{(1)} = x_{(1+1)} \quad (V)$$

Aplicando-se (II) e (V) em (IV):

$$V_{(i-1)} \cdot y_{(i-1)} = L_{(i)} \cdot x_{(i)} \quad (VI)$$

Aplicando-se (III) em (VI):

$$y_{(i-1)} = x_{(i)} \quad (VII)$$

BALANÇO DE ENERGIA:

$$V_{(i-1)} \cdot H_{v(i-1)} + L_{(i+1)} \cdot H_{l(i+1)} = V_{(i)} \cdot H_{v(i)} + L_{(i)} \cdot H_{l(i)} \quad (VIII)$$

Aplicando (II) e (III) em (VIII):

$$L_{(1)} \cdot H_{V(1-1)} + L_{(1+1)} \cdot H_{1(1+1)} = L_{(1+1)} \cdot H_{V(1)} + L_{(1)} \cdot H_{1(1)}$$

donde que:

$$L_{(1+1)} \cdot [H_{1(1+1)} - H_{V(1)}] = L_{(1)} \cdot [H_{1(1)} - H_{V(1-1)}]$$

$$L_{(1)} = \frac{H_{1(1+1)} - H_{V(1)}}{H_{1(1)} - H_{V(1-1)}} \cdot L_{(1+1)} \quad (IX)$$

ou então:

$$L_{(1-1)} = \frac{H_{1(1)} - H_{V(1-1)}}{H_{1(1-1)} - H_{V(1-2)}} \cdot L_{(1)} \quad (X)$$

onde: H_1 e H_V são as entalpias do líquido e do vapor.

L e V são as vazões molares do líquido e do vapor.

x e y são as composições em fração molar do líquido e do vapor.

Nas equações (IX) ou (X) são necessários os valores das entalpias do líquido e do vapor da mistura etanol-água. BROWN (1965) apresenta uma tabela destes valores em função da composição em etanol. Os valores da tabela foram ajustados na forma de um polinômio, obtendo-se as seguintes equações para o cálculo das entalpias:

Fase líquida:

$$\Delta H_{\text{vap. lq.}} = 1799,82 - 3030,76.x_a + 18933.x_a^2 - 40331,5.x_a^3 + 38472,7.x_a^4 - 13567.x_a^5 \quad (\text{XI})$$

Fase vapor:

$$\Delta H_{\text{vap. v}} = 11505,8 + 579,934.x_a - 2989,25.x_a^2 + 7853,8.x_a^3 - 8674,9.x_a^4 + 3425,39.x_a^5 \quad (\text{XII})$$

Utilizando-se as equações (II), (V) e (IX) em conjunto com as equações (XI) e (XII) e conhecendo-se as composições em cada estágio, pode-se calcular as vazões molares em cada estágio.

As velocidades superficiais do vapor e do líquido em cada estágio são calculadas a partir da vazão molar de cada fase.

As equações envolvidas no cálculo das vazões molares e das velocidades superficiais estão apresentadas no programa DADOS.BAS na subrotina da linha 17000.

b) Operação em refluxo parcial:

Pelos resultados dos cálculos das vazões molares em refluxo total e que estão ilustrados na tabela 3.4, observa-se que a vazão molar de cada fase nos diferentes estágios é praticamente constante. Em função disto se utilizará que $L_1 = L_2 = \dots = L_{\text{refluxo}}$ e que $V_1 = V_2 = \dots = V_{\text{condensado}}$. Esta hipótese normalmente é utilizada no cálculo aproximado de colunas de destilação.

APÊNDICE H

TABELAS DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais estão apresentados na forma de tabelas. Abaixo ilustram-se os significados dos números conforme a sua posição nas tabelas.

a) Experimentos realizados com refluxo total:

AA.AA		B.BBBB		CCCCC	
DDD.DD		E.EE		F.FFFF	
Refv.	Refv.	Refv.	Refv.	Refv.	Refv.
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2
G.GGG	HH.H	I.IIIII	J		
12	12	12	12	12	12
Conds.	Conds.	Conds.	Conds.	Conds.	Conds.

- A = Área livre de escoam. (%)
B = Diâm. do orifício (cm)
C = Rel. de refluxo (total ou parcial)
D = Veloc. sup. do vapor que deixa o prato 12 (cm/s)
E = Conc. inicial no reserv. (% fr. m. de etanol)
F = Vazão molar das fases líq. e vapor (moles/s)
G = Conc. do líq. nos pratos (fr. m. de etanol)
H = Altura da dispersão (cm)
I = Vel. sup. do líq. que deixa o prato (cm/s)
J = Regime de escoamento
I = não observável; A = abaixo da retenção; S =

spray; C = celular; T = misto(C+F); M = transição froth-spray; F = froth. OBS.: para o refv., prato 12 e conds., a altura da dispersão e o regime de escoamento não eram observáveis.

9.89 27.10 .0207	.3969 1.00	TOTAL	9.89 30.69 .0234	.3969 1.00	TOTAL	9.89 42.58 .0322	.3969 1.00	TOTAL	9.89 43.40 .0323	.3969 1.00	TOTAL
0.000	0.0	0.0000 I	0.000	0.0	0.0000 I	0.000	0.0	0.0000 I	0.000	0.0	0.0000 I
0.000	0.0	.0170 S	0.000	0.0	.0193 S	0.000	2.5	.0266 F	0.000	3.0	.0269 F
0.000	0.0	.0170 S	0.000	0.0	.0193 S	0.000	2.5	.0266 F	0.000	5.0	.0269 F
0.000	0.0	.0170 S	0.000	0.0	.0193 S	0.000	2.5	.0266 F	0.000	2.5	.0269 F
0.000	0.0	.0170 A	0.000	0.0	.0193 A	0.000	2.5	.0266 F	0.000	2.5	.0269 F
.002	0.0	.0170 A	0.000	0.0	.0193 A	0.000	2.5	.0267 F	0.000	2.5	.0270 F
.003	0.0	.0171 A	0.000	0.0	.0193 A	0.000	0.0	.0267 S	0.000	2.5	.0270 F
.010	0.0	.0173 S	0.000	0.0	.0194 S	0.000	2.5	.0268 F	0.000	2.5	.0271 F
.015	0.0	.0175 S	.002	0.0	.0193 S	0.000	0.0	.0267 S	0.000	2.5	.0270 F
.017	10.0	.0175 F	.013	0.0	.0196 S	.002	11.0	.0267 F	.001	5.5	.0270 F
.188	4.5	.0239 T	.073	5.5	.0221 F	.023	11.0	.0270 F	.000	11.0	.0273 F
.497	9.5	.0374 T	.292	8.5	.0322 F	.107	11.5	.0325 F	.027	12.0	.0283 F
.653	0.0	.0443 I	.553	0.0	.0453 I	.231	0.0	.0403 I	.082	0.0	.0314 I
.712	0.0	.0471 I	.619	0.0	.0486 I	.486	0.0	.0579 I	.370	0.0	.0509 I

9.89 18.67 .0143	.3969 1.60	TOTAL	9.89 20.01 .0214	.3969 1.60	TOTAL	9.89 29.24 .0224	.3969 1.60	TOTAL	9.89 31.76 .0243	.3969 1.60	TOTAL
0.000	0.0	0.0000 I	0.000	0.0	0.0000 I	0.000	0.0	0.0000 I	0.000	0.0	0.0000 I
.039	0.0	.0125 S	0.000	0.0	.0179 S	0.000	0.0	.0187 S	0.000	0.0	.0203 S
.295	0.0	.0195 R	.001	0.0	.0175 S	0.000	0.0	.0183 S	0.000	0.0	.0198 S
.302	4.0	.0221 C	.003	0.0	.0176 S	0.000	0.0	.0183 S	0.000	0.0	.0198 S
.553	4.0	.0273 C	.013	0.0	.0179 S	.000	0.0	.0185 S	.003	4.0	.0199 F
.682	5.0	.0313 C	.041	3.5	.0189 F	.016	0.0	.0180 F	.006	3.0	.0200 F
.723	5.0	.0326 C	.301	4.5	.0296 F	.142	5.0	.0237 F	.075	4.0	.0228 F
.794	5.5	.0349 C	.533	7.0	.0401 T	.471	7.5	.0389 F	.329	9.5	.0349 F
.794	4.0	.0349 C	.627	10.0	.0444 T	.627	9.5	.0464 F	.566	10.5	.0472 F
.807	5.5	.0353 C	.682	11.0	.0470 T	.691	10.5	.0475 F	.682	10.5	.0533 F
.821	5.0	.0358 C	.723	10.0	.0490 T	.734	10.5	.0517 F	.712	10.5	.0549 F
.821	5.0	.0358 C	.745	9.5	.0501 T	.745	9.5	.0523 F	.769	10.0	.0581 F
.835	0.0	.0363 I	.769	0.0	.0512 I	.794	0.0	.0540 I	.794	0.0	.0595 I
.835	0.0	.0363 I	.794	0.0	.0525 I	.794	0.0	.0540 I	.807	0.0	.0602 I

9.89 34.10 .0262	.3969 1.60	TOTAL	9.89 19.08 .0152	.3969 2.30	TOTAL	9.89 29.07 .0223	.3969 2.30	TOTAL	9.89 20.08 .0221	.3969 2.30	TOTAL
0.000	0.0	0.0000 I	.010	0.0	0.0000 I	.005	0.0	0.0000 I	.004	0.0	0.0000 I
0.000	0.0	.0219 S	.044	0.0	.0134 R	.006	0.0	.0183 A	.004	0.0	.0181 S
0.000	0.0	.0213 S	.215	0.0	.0182 R	.021	7.5	.0188 F	.016	7.0	.0185 F
0.000	0.0	.0214 S	.390	0.0	.0230 R	.165	6.0	.0244 F	.153	6.0	.0238 F
.003	0.0	.0214 S	.540	5.0	.0286 C	.503	8.0	.0400 F	.446	7.0	.0371 F
.015	0.0	.0219 S	.682	5.0	.0333 C	.645	11.0	.0468 F	.627	10.5	.0456 F
.067	4.0	.0242 F	.794	5.0	.0371 C	.702	11.0	.0496 F	.712	10.5	.0490 F
.319	10.0	.0371 F	.794	6.0	.0371 C	.794	10.5	.0542 F	.769	10.5	.0526 F
.546	11.0	.0497 F	.794	4.5	.0371 C	.807	9.5	.0549 F	.807	9.5	.0546 F
.663	11.0	.0563 F	.794	7.0	.0371 T	.821	10.0	.0556 F	.835	10.0	.0560 F
.712	11.0	.0591 F	.794	7.0	.0371 T	.849	10.0	.0570 F	.835	10.0	.0560 F
.769	10.5	.0625 F	.794	7.0	.0371 T	.849	9.5	.0570 F	.864	10.0	.0575 F
.794	0.0	.0640 I	.794	0.0	.0371 I	.880	0.0	.0586 I	.864	0.0	.0575 I
.794	0.0	.0640 I	.835	0.0	.0386 I	.880	0.0	.0586 I	.864	0.0	.0575 I

9.89	.3969	TOTAL	9.89	.3969	TOTAL	9.89	.3969	TOTAL	9.89	.3969	TOTAL
31.03	2.36		34.18	2.36		19.24	3.00		20.41	3.00	
	.0238			.0262			.0147			.0156	
.000	0.0	0.0000 I	.000	0.0	0.0000 I	.012	0.0	0.0000 I	.013	0.0	0.0000 I
.003	0.0	.0194 S	.004	0.0	.0215 R	.143	0.0	.0156 S	.136	0.0	.0163 S
.013	7.5	.0198 F	.013	1.5	.0218 S	.378	4.5	.0226 C	.390	0.0	.0244 S
.119	4.0	.0240 F	.045	3.5	.0232 F	.573	5.5	.0287 C	.533	5.5	.0291 C
.402	10.5	.0377 F	.264	9.5	.0340 F	.672	5.5	.0319 C	.653	6.0	.0332 C
.595	12.0	.0474 F	.539	11.5	.0492 F	.734	5.5	.0339 C	.712	5.5	.0352 C
.691	11.0	.0524 F	.636	11.5	.0547 F	.781	5.5	.0355 C	.781	6.0	.0377 C
.734	10.5	.0547 F	.682	11.0	.0573 F	.807	6.0	.0364 C	.807	7.0	.0386 T
.757	10.0	.0559 F	.757	10.0	.0617 F	.807	4.5	.0364 C	.821	5.0	.0391 C
.794	10.5	.0579 F	.757	10.0	.0617 F	.807	7.0	.0364 C	.835	7.5	.0396 T
.807	10.5	.0586 F	.794	10.0	.0639 F	.835	6.5	.0373 C	.835	7.5	.0396 T
.807	10.0	.0586 F	.821	9.5	.0656 F	.849	7.0	.0378 C	.835	8.0	.0396 T
.821	0.0	.0594 I	.821	0.0	.0656 I	.849	0.0	.0378 I	.849	0.0	.0401 I
.849	0.0	.0610 I	.821	0.0	.0656 I	.849	0.0	.0378 I	.849	0.0	.0401 I

9.89	.3969	TOTAL	9.89	.3969	TOTAL	9.89	.3969	TOTAL	14.25	.4762	TOTAL
29.25	3.00		30.62	3.00		31.40	3.00		26.70	1.00	
	.0224			.0235			.0241			.0204	
.003	0.0	0.0000 I	.003	0.0	0.0000 I	.004	0.0	0.0000 I	.001	0.0	0.0000 I
.021	3.5	.0109 F	.039	3.5	.0205 F	.021	4.5	.0203 F	.006	5.0	.0160 F
.217	6.5	.0269 F	.264	0.0	.0304 F	.157	6.5	.0261 F	.056	0.0	.0184 A
.527	10.5	.0415 F	.539	11.0	.0440 F	.521	11.0	.0442 F	.147	0.0	.0210 A
.693	10.5	.0475 F	.653	11.0	.0490 F	.653	11.0	.0510 F	.356	0.0	.0304 A
.712	11.0	.0504 F	.712	10.5	.0520 F	.723	11.0	.0540 F	.451	2.5	.0345 C
.757	10.5	.0527 F	.769	10.0	.0558 F	.789	10.5	.0573 F	.580	3.5	.0405 C
.794	10.5	.0546 F	.794	10.0	.0572 F	.821	10.5	.0602 F	.672	4.5	.0442 C
.821	9.5	.0560 F	.807	10.0	.0579 F	.821	10.0	.0602 F	.723	4.0	.0445 C
.821	10.0	.0560 F	.807	9.5	.0579 F	.821	10.0	.0602 F	.794	3.5	.0499 C
.821	10.0	.0560 F	.821	9.5	.0587 F	.821	10.0	.0602 F	.821	3.0	.0511 C
.835	9.5	.0560 F	.835	9.5	.0594 F	.849	9.5	.0617 F	.835	3.0	.0510 C
.849	0.0	.0575 I	.849	0.0	.0602 I	.849	0.0	.0617 I	.835	0.0	.0518 I
.849	0.0	.0575 I	.849	0.0	.0602 I	.849	0.0	.0617 I	.849	0.0	.0525 I

14.25	.4762	TOTAL	14.25	.4762	TOTAL	14.25	.4762	TOTAL	14.25	.4762	TOTAL
39.61	1.00		40.72	1.00		52.41	1.00		26.22	1.00	
	.0303			.0312			.0401			.0201	
.000	0.0	0.0000 I	.000	0.0	0.0000 I	.000	0.0	0.0000 I	.000	0.0	0.0000 I
.001	0.0	.0247 S	.000	2.5	.0254 F	.000	3.0	.0320 F	.067	0.0	.0185 S
.002	0.0	.0248 A	.001	2.5	.0254 F	.000	3.0	.0320 F	.339	0.0	.0292 A
.007	0.0	.0250 A	.002	0.0	.0255 S	.000	3.0	.0320 F	.427	0.0	.0329 A
.008	0.0	.0250 A	.002	0.0	.0255 S	.000	2.5	.0320 F	.497	0.0	.0359 A
.038	4.5	.0265 F	.010	0.0	.0259 S	.002	2.5	.0329 F	.546	2.5	.0380 C
.183	1.5	.0345 S	.024	1.5	.0265 S	.003	2.5	.0329 F	.663	3.0	.0431 C
.423	5.0	.0495 T	.084	1.5	.0297 S	.006	4.0	.0331 F	.723	3.5	.0450 C
.595	5.5	.0607 T	.301	4.0	.0429 F	.041	3.0	.0353 F	.781	3.5	.0484 C
.691	7.5	.0670 F	.521	7.5	.0575 F	.329	7.0	.0577 F	.807	3.5	.0496 C
.757	6.5	.0715 F	.644	7.5	.0657 F	.539	10.5	.0757 F	.821	3.0	.0543 C
.807	7.0	.0750 F	.723	8.5	.0712 F	.636	10.5	.0841 F	.835	3.0	.0509 C
.821	0.0	.0760 I	.794	0.0	.0762 I	.691	0.0	.0889 I	.835	0.0	.0509 I
.821	0.0	.0760 I	.807	0.0	.0772 I	.757	0.0	.0949 I	.835	0.0	.0509 I

14.25	.4762	TOTAL		14.25	.4762	TOTAL		14.25	.4762	TOTAL		14.25	.4762	TOTAL	
34.37	1.60			41.83	1.60			47.45	1.60			54.70	1.60		
.0263				.0320				.0363				.0419			
.005	0.0	0.0000	I	.001	0.0	0.0000	I	.000	0.0	0.0000	I	.000	0.0	0.0000	I
.029	0.0	.0226	S	.010	3.0	.0265	T	.003	3.0	.0297	F	.000	3.0	.0341	F
.232	0.0	.0324	A	.136	0.0	.0335	A	.010	2.5	.0301	F	.000	3.0	.0343	F
.326	1.5	.0301	S	.199	2.0	.0374	F	.049	2.0	.0324	F	.004	3.5	.0343	F
.401	4.0	.0462	T	.271	4.5	.0400	T	.155	2.0	.0393	F	.023	3.5	.0356	F
.627	5.0	.0544	T	.559	7.5	.0615	T	.363	0.0	.0547	F	.122	4.0	.0427	F
.723	5.0	.0600	T	.682	7.5	.0701	T	.559	10.0	.0699	F	.363	11.5	.0631	F
.757	6.0	.0620	T	.723	9.0	.0730	T	.602	10.0	.0796	F	.521	12.0	.0771	F
.701	5.5	.0635	T	.745	9.0	.0746	T	.712	10.0	.0820	F	.600	12.0	.0842	F
.807	5.0	.0650	T	.745	8.5	.0746	T	.701	9.0	.0877	F	.645	11.5	.0803	F
.821	4.5	.0659	T	.794	8.0	.0782	T	.794	9.0	.0800	F	.723	11.5	.0755	F
.835	5.0	.0668	T	.835	0.0	.0813	I	.807	9.0	.0899	F	.769	10.5	.0799	F
.835	0.0	.0668	I	.835	0.0	.0813	I	.821	0.0	.0911	I	.807	0.0	.1036	I
.835	0.0	.0668	I	.835	0.0	.0813	I	.821	0.0	.0911	I	.821	0.0	.1049	I

14.25	.4762	TOTAL		14.25	.4762	TOTAL		14.25	.4762	TOTAL		14.25	.4762	TOTAL	
27.36	2.30			32.56	2.30			40.83	2.30			44.96	2.30		
.0210				.0249				.0313				.0344			
.013	0.0	0.0000	I	.010	0.0	0.0000	I	.005	0.0	0.0000	I	.004	0.0	0.0000	I
.192	0.0	.0241	S	.146	0.0	.0265	S	.032	1.5	.0200	S	.063	2.5	.0314	F
.432	0.0	.0346	S	.329	2.0	.0357	S	.262	2.5	.0404	S	.264	3.0	.0446	F
.515	2.0	.0383	C	.503	3.5	.0440	T	.471	5.0	.0542	F	.451	6.0	.0581	F
.546	3.0	.0396	C	.636	5.0	.0519	T	.619	6.0	.0640	F	.611	6.0	.0699	F
.636	3.5	.0437	C	.745	6.0	.0580	T	.712	9.0	.0704	F	.691	9.0	.0759	F
.712	3.5	.0472	C	.794	5.5	.0600	T	.769	8.0	.0745	F	.757	9.0	.0810	F
.701	4.0	.0505	C	.835	6.0	.0631	T	.794	8.5	.0763	F	.807	9.5	.0849	F
.807	3.5	.0517	C	.835	6.0	.0631	T	.821	8.5	.0782	F	.821	9.0	.0861	F
.821	3.5	.0524	C	.849	5.5	.0639	T	.835	8.0	.0792	F	.835	8.5	.0872	F
.821	3.0	.0524	C	.849	5.0	.0639	T	.849	8.0	.0803	F	.849	8.5	.0883	F
.835	3.0	.0531	C	.864	5.5	.0640	T	.849	8.0	.0803	T	.849	8.5	.0883	F
.849	0.0	.0530	I	.864	0.0	.0640	I	.849	0.0	.0803	I	.864	0.0	.0895	I
.849	0.0	.0530	I	.864	0.0	.0640	I	.849	0.0	.0803	I	.864	0.0	.0895	I

14.25	.4762	TOTAL		14.25	.4762	TOTAL		14.25	.4762	TOTAL		14.25	.4762	TOTAL	
53.09	2.30			26.20	3.00			32.56	3.00			39.98	3.00		
.0413				.0201				.0249				.0306			
.003	0.0	0.0000	I	.020	0.0	0.0000	I	.013	0.0	0.0000	I	.006	0.0	0.0000	I
.029	3.5	.0353	F	.222	0.0	.0243	S	.181	1.5	.0202	S	.169	1.5	.0338	S
.190	3.5	.0473	F	.476	0.0	.0349	A	.414	2.5	.0402	C	.432	4.0	.0504	T
.423	9.5	.0672	F	.539	0.0	.0376	R	.533	3.0	.0464	C	.603	5.5	.0615	T
.501	10.5	.0811	F	.559	2.5	.0384	C	.627	5.0	.0515	T	.702	6.5	.0681	F
.602	10.5	.0901	F	.611	3.0	.0407	C	.723	5.5	.0567	T	.794	9.0	.0745	F
.702	10.5	.0919	F	.672	3.5	.0433	C	.701	5.5	.0600	T	.835	8.0	.0774	F
.769	10.5	.0982	F	.723	3.5	.0456	C	.794	6.0	.0600	T	.835	8.5	.0774	F
.794	9.5	.1005	F	.794	3.5	.0489	C	.821	5.5	.0623	T	.835	8.5	.0774	F
.821	9.0	.1031	F	.835	3.0	.0500	C	.835	5.0	.0631	T	.849	8.0	.0784	F
.835	9.0	.1045	F	.849	2.5	.0514	C	.849	4.5	.0639	T	.849	7.5	.0784	F
.849	9.0	.1050	F	.864	2.5	.0521	C	.864	4.5	.0640	T	.864	7.0	.0795	F
.849	0.0	.1050	I	.800	0.0	.0529	I	.864	0.0	.0640	I	.864	0.0	.0795	I
.864	0.0	.1073	I	.800	0.0	.0529	I	.864	0.0	.0640	I	.800	0.0	.0806	I

14.25 .4762 TOTAL 44.49 3.00 .0341	14.25 .4762 TOTAL 48.24 3.00 .0369	19.00 .5500 TOTAL 42.47 1.00 .0325	19.00 .5500 TOTAL 45.60 1.00 .0349
.004 0.0 .0000 I	.005 0.0 .0000 I	.000 0.0 .0000 I	.000 0.0 .0000 I
.067 2.0 .0313 S	.062 2.0 .0336 T	.024 0.0 .0277 A	.017 0.0 .0293 S
.201 4.0 .0453 F	.267 5.5 .0400 F	.079 0.0 .0306 A	.021 0.0 .0296 A
.521 6.5 .0625 F	.492 9.5 .0655 F	.267 0.0 .0424 R	.075 0.0 .0327 A
.644 7.0 .0715 F	.627 9.0 .0761 F	.332 2.0 .0469 S	.163 2.0 .0383 S
.734 9.0 .0703 F	.712 10.0 .0830 F	.446 2.5 .0547 C	.345 3.5 .0513 T
.794 0.5 .0829 F	.745 10.0 .0857 F	.559 3.0 .0625 C	.492 4.0 .0622 T
.835 9.0 .0862 F	.794 9.5 .0899 F	.682 3.5 .0712 C	.636 4.0 .0730 T
.849 0.5 .0873 F	.835 9.0 .0934 F	.702 3.0 .0726 C	.702 4.0 .0781 T
.864 0.5 .0885 F	.849 0.5 .0946 F	.757 3.0 .0767 C	.769 4.0 .0834 T
.864 0.0 .0885 F	.864 0.5 .0959 F	.794 3.0 .0795 C	.781 3.5 .0849 T
.864 0.0 .0885 F	.864 9.0 .0959 F	.794 3.0 .0795 C	.794 5.0 .0854 T
.890 0.0 .0905 I	.864 0.0 .0959 I	.807 0.0 .0804 I	.794 0.0 .0854 I
.890 0.0 .0905 I	.890 0.0 .0972 I	.821 0.0 .0815 I	.807 0.0 .0864 I

19.00 .5500 TOTAL 56.79 1.00 .0435	19.00 .5500 TOTAL 61.95 1.00 .0474	19.00 .5500 TOTAL 75.02 1.00 .0574	19.00 .5500 TOTAL 38.93 1.00 .0298
.000 0.0 .0000 I	.000 0.0 .0000 I	.000 0.0 .0000 I	.007 0.0 .0000 I
.000 0.0 .0358 A	.000 0.0 .0390 A	.000 1.5 .0474 S	.050 0.0 .0270 A
.004 1.0 .0357 S	.000 0.0 .0387 A	.000 2.0 .0470 S	.287 0.0 .0401 A
.010 3.5 .0361 T	.003 0.0 .0380 A	.000 1.5 .0469 S	.419 1.5 .0484 S
.006 0.0 .0416 A	.008 2.5 .0392 F	.001 2.5 .0469 F	.486 2.0 .0526 S
.144 1.5 .0462 S	.023 1.5 .0403 S	.003 2.5 .0471 F	.588 3.0 .0591 C
.363 4.0 .0656 F	.109 2.0 .0472 S	.012 3.5 .0479 F	.672 3.5 .0646 C
.539 5.5 .0818 F	.319 4.5 .0670 F	.060 3.0 .0532 F	.723 3.5 .0679 C
.672 7.5 .0943 F	.492 7.5 .0844 F	.239 0.0 .0710 F	.781 3.5 .0719 C
.712 7.0 .0902 F	.653 0.4 .1000 F	.401 9.0 .1011 F	.781 3.0 .0719 C
.769 6.5 .1030 F	.723 7.5 .1002 F	.611 9.5 .1171 F	.821 3.0 .0746 C
.794 7.0 .1063 F	.794 7.5 .1159 F	.702 9.0 .1206 F	.835 3.0 .0756 C
.807 0.0 .1076 I	.794 0.0 .1159 I	.745 0.0 .1342 I	.835 0.0 .0756 I
.807 0.0 .1076 I	.821 0.0 .1180 I	.781 0.0 .1309 I	.835 0.0 .0756 I

19.00 .5500 TOTAL 48.26 1.00 .0369	19.00 .5500 TOTAL 56.63 1.00 .0434	19.00 .5500 TOTAL 64.36 1.00 .0493	19.00 .5500 TOTAL 73.50 1.00 .0563
.005 0.0 .0000 I	.004 0.0 .0000 I	.001 0.0 .0000 I	.001 0.0 .0000 I
.055 0.0 .0333 A	.053 0.0 .0389 A	.020 0.0 .0416 S	.008 2.0 .0464 S
.190 0.0 .0425 A	.181 0.0 .0490 A	.104 0.0 .0406 A	.055 0.0 .0507 A
.201 2.0 .0493 S	.241 3.0 .0542 H	.186 0.0 .0562 S	.104 1.0 .0555 S
.436 3.5 .0614 F	.432 5.0 .0716 F	.346 6.5 .0724 F	.259 8.0 .0725 F
.559 4.0 .0710 F	.573 6.0 .0846 F	.539 0.0 .0926 F	.406 9.5 .0994 F
.636 5.0 .0772 F	.636 6.0 .0905 F	.636 8.0 .1029 F	.603 9.5 .1134 F
.712 4.5 .0834 F	.745 6.5 .1010 F	.702 8.5 .1100 F	.682 9.0 .1231 F
.723 4.5 .0843 F	.781 6.5 .1045 F	.745 8.5 .1140 F	.712 9.0 .1269 F
.781 5.0 .0892 F	.807 6.5 .1071 F	.794 8.0 .1203 F	.757 8.5 .1326 F
.807 4.5 .0914 F	.807 6.0 .1071 F	.821 7.5 .1234 F	.794 7.5 .1374 F
.821 5.0 .0926 F	.821 6.5 .1085 F	.835 7.5 .1250 F	.821 7.5 .1409 F
.821 0.0 .0926 I	.821 0.0 .1085 I	.835 0.0 .1250 I	.835 0.0 .1420 I
.821 0.0 .0926 I	.835 0.0 .1100 I	.835 0.0 .1250 I	.835 0.0 .1420 I

19.00	.5500	TOTAL		19.00	.5500	TOTAL		19.00	.5500	TOTAL		19.00	.5500	TOTAL	
41.72	2.30			46.45	2.30			56.31	2.30			63.54	2.30		
.0320				.0355				.0431				.0407			
.014	0.0	0.0000	I	.012	0.0	0.0000	I	.009	0.0	0.0000	I	.006	0.0	0.0000	I
.101	0.0	.0313	A	.081	0.0	.0337	A	.090	0.0	.0415	A	.109	1.0	.0485	S
.363	0.0	.0401	R	.342	1.5	.0521	S	.256	2.5	.0553	S	.186	1.5	.0556	S
.441	1.5	.0534	S	.446	2.5	.0599	T	.441	3.5	.0721	F	.349	5.0	.0719	F
.527	2.5	.0592	T	.546	4.0	.0675	T	.553	7.0	.0823	F	.533	8.0	.0900	F
.580	3.0	.0633	T	.611	4.0	.0725	T	.627	7.0	.0892	F	.627	8.0	.1007	F
.653	3.5	.0670	T	.692	4.0	.0780	T	.691	6.0	.0953	F	.702	7.5	.1087	F
.702	3.5	.0713	T	.712	4.5	.0804	T	.712	7.0	.0973	F	.723	7.5	.1110	F
.769	3.0	.0761	T	.723	4.5	.0813	T	.757	6.5	.1017	F	.757	7.5	.1147	F
.794	3.0	.0780	T	.723	3.5	.0813	T	.794	6.5	.1053	F	.781	7.5	.1174	F
.821	2.5	.0800	T	.757	3.5	.0840	T	.794	6.5	.1053	F	.794	7.0	.1189	F
.835	3.0	.0810	T	.781	5.0	.0860	T	.807	7.0	.1066	F	.807	7.0	.1203	F
.835	0.0	.0810	I	.794	0.0	.0870	I	.807	0.0	.1066	I	.821	0.0	.1219	I
.835	0.0	.0810	I	.794	0.0	.0870	I	.821	0.0	.1066	I	.821	0.0	.1219	I

19.00	.5500	TOTAL		19.00	.5500	TOTAL		19.00	.5500	TOTAL		19.00	.5500	TOTAL	
71.53	2.30			41.72	3.00			47.09	3.00			53.12	3.00		
.0548				.0320				.0367				.0407			
.005	0.0	0.0000	I	.021	0.0	0.0000	I	.019	0.0	0.0000	I	.014	0.0	0.0000	I
.049	0.0	.0506	A	.175	0.0	.0350	A	.147	0.0	.0390	R	.133	1.0	.0421	S
.146	2.0	.0502	R	.423	0.0	.0521	R	.367	1.5	.0555	S	.323	3.0	.0576	F
.319	6.5	.0773	F	.486	1.0	.0564	S	.401	3.0	.0643	T	.492	3.5	.0721	F
.527	8.5	.1015	F	.559	3.0	.0614	C	.603	4.0	.0739	T	.627	7.0	.0838	F
.636	0.5	.1143	F	.627	3.0	.0660	T	.682	4.0	.0802	T	.723	7.0	.0924	F
.702	8.5	.1222	F	.682	3.0	.0699	T	.723	4.0	.0835	T	.781	5.5	.0978	F
.734	8.5	.1262	F	.723	3.0	.0720	T	.757	4.0	.0863	T	.807	7.0	.1002	F
.781	8.5	.1320	F	.769	3.0	.0761	T	.781	4.0	.0884	T	.835	7.0	.1020	F
.794	8.0	.1337	F	.781	2.5	.0770	T	.807	3.5	.0906	T	.849	6.5	.1042	F
.807	7.5	.1353	F	.794	2.5	.0780	T	.821	3.5	.0917	T	.849	6.0	.1042	F
.821	7.5	.1371	F	.807	2.5	.0789	T	.835	4.5	.0929	T	.864	6.5	.1056	F
.821	0.0	.1371	I	.821	0.0	.0800	I	.849	0.0	.0941	I	.864	0.0	.1056	I
.835	0.0	.1389	I	.835	0.0	.0810	I	.849	0.0	.0941	I	.890	0.0	.1080	I

19.00	.5500	TOTAL		19.00	.5500	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL	
65.13	3.00			69.71	3.00			50.54	1.00			62.53	1.00		
.0499				.0534				.0387				.0478			
.011	0.0	0.0000	I	.011	0.0	0.0000	I	.002	0.0	0.0000	I	.000	0.0	0.0000	I
.117	0.0	.0503	R	.099	0.0	.0521	S	.100	0.0	.0300	A	.132	0.0	.0498	A
.254	3.5	.0636	F	.217	6.0	.0641	F	.210	0.0	.0462	A	.212	0.0	.0572	A
.465	6.0	.0857	F	.423	8.0	.0870	F	.326	0.0	.0554	A	.295	1.0	.0654	S
.595	8.5	.0995	F	.596	8.5	.1066	F	.356	1.0	.0579	S	.332	2.0	.0691	F
.691	8.5	.1099	F	.663	9.0	.1144	F	.476	2.0	.0678	M	.423	3.0	.0783	F
.723	7.5	.1135	F	.734	8.0	.1220	F	.533	2.5	.0725	T	.521	4.0	.0883	F
.794	8.0	.1215	F	.800	8.0	.1310	F	.619	3.0	.0796	T	.611	4.0	.0976	F
.807	8.0	.1230	F	.835	8.0	.1352	F	.682	3.0	.0850	T	.672	4.0	.1040	F
.835	8.0	.1263	F	.850	8.0	.1370	F	.702	3.0	.0867	T	.682	4.5	.1050	F
.835	7.5	.1263	F	.850	7.5	.1370	F	.723	3.0	.0885	T	.712	4.5	.1082	F
.849	7.0	.1279	F	.850	7.0	.1370	F	.723	3.0	.0885	T	.723	5.0	.1094	F
.849	0.0	.1279	I	.865	0.0	.1389	I	.757	0.0	.0915	I	.723	0.0	.1094	I
.864	0.0	.1296	I	.865	0.0	.1389	I	.769	0.0	.0926	I	.781	0.0	.1157	I

22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL	
74.11	1.00			80.91	1.00			93.05	1.00			49.45	1.00		
.0567				.0619				.0711				.0378			
.0000	0.0	0.0000	I	.0000	0.0	0.0000	I	.0000	0.0	0.0000	I	.0000	0.0	0.0000	I
.012	1.0	.0474	S	.0000	1.5	.0509	S	.0000	2.0	.0506	F	.096	0.0	.0369	A
.057	1.0	.0515	F	.0000	1.5	.0524	S	.0000	2.0	.0603	F	.298	0.0	.0519	A
.101	0.0	.0559	A	.001	0.0	.0506	A	.0000	2.0	.0502	F	.360	0.0	.0569	A
.115	1.0	.0573	S	.004	3.0	.0509	F	.001	2.5	.0503	F	.389	1.0	.0592	S
.236	2.0	.0707	F	.027	1.0	.0531	H	.007	4.0	.0509	F	.492	1.5	.0675	H
.400	4.0	.0902	F	.072	2.0	.0578	H	.044	2.5	.0632	F	.588	2.0	.0752	T
.521	6.5	.1049	F	.239	5.0	.0775	F	.106	3.5	.0817	F	.611	2.5	.0771	T
.619	6.0	.1168	F	.441	6.5	.1030	F	.302	0.0	.1106	F	.602	2.5	.0830	T
.672	6.0	.1234	F	.559	7.5	.1194	F	.533	9.0	.1305	F	.712	2.5	.0855	T
.691	6.5	.1258	F	.636	7.5	.1297	F	.603	0.5	.1442	F	.712	2.5	.0855	T
.702	6.0	.1272	F	.712	7.5	.1401	F	.602	0.0	.1566	F	.734	2.5	.0874	T
.723	0.0	.1299	I	.712	0.0	.1401	I	.682	0.0	.1566	I	.734	0.0	.0874	I
.757	0.0	.1343	I	.769	0.0	.1402	I	.745	0.0	.1667	I	.794	0.0	.0926	I

22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL	
57.22	1.60			69.97	1.60			79.98	1.60			94.03	1.60		
.0430				.0536				.0612				.0720			
.006	0.0	0.0000	I	.004	0.0	0.0000	I	.002	0.0	0.0000	I	.000	0.0	0.0000	I
.135	0.0	.0457	R	.215	0.0	.0643	R	.067	0.0	.0566	R	.036	0.0	.0627	S
.319	1.0	.0619	S	.234	1.0	.0663	S	.135	1.0	.0641	S	.099	1.0	.0705	S
.432	2.0	.0723	H	.356	3.0	.0799	F	.239	3.0	.0766	F	.249	3.5	.0914	F
.546	3.5	.0829	F	.492	6.0	.0954	F	.406	6.5	.0901	F	.423	0.5	.1177	F
.627	4.5	.0906	F	.595	7.5	.1072	F	.546	0.5	.1163	F	.527	9.5	.1336	F
.682	5.0	.0958	F	.691	7.5	.1104	F	.627	0.5	.1270	F	.619	0.5	.1479	F
.712	4.0	.0988	F	.723	7.0	.1222	F	.682	0.0	.1344	F	.663	0.0	.1540	F
.734	3.5	.1009	F	.745	6.5	.1249	F	.702	7.5	.1372	F	.712	0.0	.1626	F
.781	3.5	.1056	F	.781	6.5	.1293	F	.712	7.5	.1305	F	.734	0.0	.1662	F
.794	3.5	.1069	F	.807	6.5	.1325	F	.734	7.5	.1416	F	.757	7.5	.1700	F
.807	4.5	.1083	F	.821	6.5	.1343	F	.769	7.0	.1465	F	.794	7.5	.1761	F
.821	0.0	.1097	I	.821	0.0	.1343	I	.781	0.0	.1482	I	.807	0.0	.1703	I
.835	0.0	.1111	I	.821	0.0	.1343	I	.781	0.0	.1482	I	.807	0.0	.1703	I

22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL	
48.85	2.30			58.41	2.30			66.75	2.30			76.30	2.30		
.0274				.0447				.0511				.0584			
.014	0.0	0.0000	I	.013	0.0	0.0000	I	.008	0.0	0.0000	I	.006	0.0	0.0000	I
.150	0.0	.0401	A	.140	0.0	.0471	S	.133	0.0	.0531	R	.130	0.0	.0512	S
.390	0.0	.0585	A	.390	1.5	.0699	S	.310	2.5	.0712	H	.217	2.5	.0702	F
.441	0.0	.0626	A	.476	2.0	.0700	H	.471	2.5	.0806	H	.306	4.0	.0900	F
.492	1.5	.0666	F	.553	3.5	.0853	F	.573	5.0	.0997	F	.559	0.0	.1122	F
.506	1.5	.0737	F	.636	4.5	.0933	F	.663	7.0	.1097	F	.672	0.0	.1265	F
.653	2.5	.0796	F	.702	4.5	.0990	F	.712	7.0	.1152	F	.723	7.5	.1331	F
.702	2.5	.0836	F	.723	4.0	.1019	F	.734	6.5	.1170	F	.734	7.0	.1346	F
.723	2.0	.0854	F	.745	3.5	.1042	F	.781	5.5	.1232	F	.769	6.5	.1392	F
.745	2.5	.0873	F	.781	3.5	.1070	F	.794	6.0	.1240	F	.794	6.5	.1426	F
.781	2.5	.0903	F	.794	3.0	.1092	F	.821	5.5	.1200	F	.807	6.5	.1444	F
.807	2.5	.0926	F	.821	4.0	.1120	F	.821	5.5	.1200	F	.821	6.5	.1463	F
.807	0.0	.0926	I	.821	0.0	.1120	I	.835	0.0	.1296	I	.821	0.0	.1463	I
.807	0.0	.0926	I	.835	0.0	.1134	I	.835	0.0	.1296	I	.835	0.0	.1482	I

22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL	
83.63	2.34			48.34	3.00			55.54	3.00			63.18	3.00		
.0648				.0378				.0425				.0484			
.004	0.0	0.0000	I	.020	0.0	0.0000	I	.019	0.0	0.0000	I	.015	0.0	0.0000	I
.086	1.0	.0610	S	.173	0.0	.0412	A	.236	0.0	.0528	S	.219	1.0	.0584	S
.183	3.5	.0726	F	.432	0.0	.0610	S	.410	1.5	.0602	M	.419	3.0	.0785	F
.394	6.0	.1005	F	.509	1.0	.0670	S	.503	2.5	.0766	M	.533	3.0	.0902	F
.559	8.5	.1229	F	.553	2.0	.0705	T	.588	3.5	.0843	F	.627	5.0	.1000	F
.653	8.5	.1359	F	.619	2.0	.0757	T	.663	3.5	.0913	F	.682	6.5	.1058	F
.712	0.0	.1442	F	.682	2.5	.0808	F	.702	3.5	.0949	F	.712	6.5	.1091	F
.769	7.5	.1525	F	.723	2.5	.0842	F	.723	3.5	.0969	F	.757	6.0	.1140	F
.794	7.5	.1542	F	.745	2.5	.0860	F	.745	3.0	.0990	F	.781	5.5	.1166	F
.847	7.5	.1581	F	.769	2.5	.0881	F	.781	3.0	.1025	F	.794	6.0	.1181	F
.835	7.0	.1623	F	.794	2.0	.0902	F	.794	3.0	.1038	F	.821	5.5	.1211	F
.835	6.5	.1623	F	.821	2.5	.0925	F	.807	3.0	.1051	F	.821	5.5	.1211	F
.835	0.0	.1623	I	.835	0.0	.0937	I	.807	0.0	.1051	I	.821	0.0	.1211	I
.849	0.0	.1644	I	.849	0.0	.0949	I	.821	0.0	.1065	I	.835	0.0	.1227	I

22.26	.5953	TOTAL		22.26	.5953	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL	
77.47	3.00			82.46	3.00			65.52	1.00			77.11	1.00		
.0593				.0632				.0501				.0590			
.013	0.0	0.0000	I	.012	0.0	0.0000	I	.001	0.0	0.0000	I	.001	0.0	0.0000	I
.192	1.5	.0684	M	.173	2.0	.0704	M	.020	0.0	.0424	A	.052	0.0	.0531	A
.398	3.5	.0937	F	.382	6.0	.0975	F	.072	0.0	.0467	A	.088	0.0	.0559	A
.553	5.5	.1132	F	.553	7.0	.1204	F	.129	0.0	.0519	A	.101	0.0	.0581	A
.644	8.0	.1249	F	.644	9.0	.1327	F	.217	0.0	.0604	A	.136	1.5	.0619	S
.723	8.0	.1352	F	.712	9.0	.1422	F	.295	1.5	.0685	S	.289	2.5	.0800	M
.769	7.5	.1414	F	.757	8.5	.1486	F	.436	2.5	.0834	M	.427	3.0	.0972	F
.794	7.5	.1448	F	.794	8.0	.1540	F	.515	3.5	.0918	F	.533	4.5	.1105	F
.794	7.0	.1448	F	.807	7.5	.1559	F	.595	3.0	.1004	F	.619	4.0	.1214	F
.807	7.0	.1466	F	.821	7.5	.1579	F	.682	3.0	.1100	F	.682	4.5	.1296	F
.835	6.5	.1505	F	.835	7.0	.1600	F	.702	3.0	.1122	F	.702	4.0	.1322	F
.835	6.5	.1505	F	.835	7.0	.1600	F	.723	3.0	.1146	F	.712	4.0	.1336	F
.835	0.0	.1505	I	.835	0.0	.1600	I	.745	0.0	.1171	I	.723	0.0	.1350	I
.835	0.0	.1505	I	.849	0.0	.1626	I	.794	0.0	.1227	I	.769	0.0	.1412	I

26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL	
83.77	1.00			91.34	1.00			101.84	1.00			65.48	1.00		
.0641				.0698				.0778				.0581			
.000	0.0	0.0000	I	.000	0.0	0.0000	I	.000	0.0	0.0000	I	.006	0.0	0.0000	I
.004	0.0	.0527	A	.000	0.0	.0573	A	.000	0.0	.0639	A	.182	0.0	.0494	A
.012	0.0	.0535	A	.001	0.0	.0573	A	.001	0.0	.0638	A	.231	0.0	.0619	A
.024	0.0	.0547	A	.001	0.0	.0573	A	.003	0.0	.0641	A	.313	1.0	.0704	S
.073	0.0	.0599	A	.003	0.0	.0575	A	.005	0.0	.0643	A	.356	1.5	.0749	S
.151	1.5	.0690	S	.026	0.0	.0600	A	.037	0.0	.0683	A	.476	2.5	.0877	M
.284	2.5	.0862	M	.044	2.0	.0621	S	.052	2.0	.0702	S	.553	2.5	.0959	M
.419	4.5	.1044	F	.126	3.0	.0722	F	.135	3.5	.0817	F	.627	3.0	.1039	F
.553	4.5	.1227	F	.319	4.0	.0993	F	.326	6.5	.1119	F	.691	2.5	.1110	F
.619	5.0	.1319	F	.476	6.5	.1227	F	.486	7.0	.1384	F	.712	3.0	.1133	F
.682	5.0	.1407	F	.595	7.0	.1405	F	.603	7.0	.1500	F	.712	3.0	.1133	F
.712	5.5	.1450	F	.682	6.5	.1539	F	.672	7.0	.1697	F	.745	3.0	.1171	F
.745	0.0	.1498	I	.712	0.0	.1586	I	.781	0.0	.1748	I	.781	0.0	.1212	I
.781	0.0	.1551	I	.734	0.0	.1620	I	.734	0.0	.1806	I	.794	0.0	.1227	I

26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL	
75.74		1.60		85.50		1.60		90.39		1.60		90.83		1.60	
	.0500				.0654				.0490				.0756		
.011	0.0	0.0000	I	.003	0.0	0.0000	I	.001	0.0	0.0000	I	.001	0.0	0.0000	I
.114	0.0	.0583	A	.115	0.0	.0660	A	.032	0.0	.0590	A	.014	0.0	.0633	A
.136	0.0	.0607	A	.157	0.0	.0711	A	.102	0.0	.0681	A	.001	0.0	.0717	A
.295	1.5	.0791	S	.213	1.0	.0783	S	.171	1.0	.0771	S	.159	1.0	.0826	S
.390	2.5	.0907	M	.336	3.0	.0950	F	.259	2.5	.0893	M	.196	3.5	.0980	F
.521	3.5	.1069	F	.401	6.0	.1151	F	.427	6.5	.1137	S	.366	7.0	.1179	F
.603	4.0	.1171	F	.508	6.0	.1300	F	.546	6.5	.1312	S	.533	7.5	.1415	F
.663	4.5	.1246	F	.627	6.0	.1356	F	.627	7.5	.1433	S	.627	7.5	.1560	F
.682	4.0	.1271	F	.702	5.5	.1464	F	.691	7.0	.1530	S	.691	7.5	.1675	F
.712	4.5	.1309	F	.745	6.0	.1527	F	.723	7.0	.1580	S	.712	7.0	.1710	F
.723	4.0	.1324	F	.769	5.5	.1563	F	.757	6.5	.1633	S	.757	7.0	.1787	F
.769	3.5	.1384	F	.781	5.5	.1581	F	.769	6.0	.1652	S	.769	6.5	.1808	F
.781	0.0	.1400	I	.794	0.0	.1601	I	.794	0.0	.1692	I	.794	0.0	.1852	I
.807	0.0	.1435	I	.807	0.0	.1620	I	.807	0.0	.1713	I	.794	0.0	.1852	I

26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL	
66.77		2.30		76.03		2.30		83.06		2.30		90.51		2.30	
	.0511				.0582				.0636				.0693		
.012	0.0	0.0000	I	.011	0.0	0.0000	I	.008	0.0	0.0000	I	.006	0.0	0.0000	I
.208	0.0	.0607	A	.239	1.0	.0726	S	.210	0.0	.0757	A	.210	0.0	.0824	A
.201	0.0	.0683	A	.353	1.0	.0864	S	.295	1.0	.0860	S	.267	1.5	.0904	M
.346	1.0	.0752	S	.427	2.0	.0956	M	.398	3.0	.1006	F	.356	2.5	.1033	M
.436	1.0	.0850	S	.481	3.5	.1022	F	.533	5.0	.1188	F	.491	6.5	.1217	F
.527	2.5	.0949	F	.508	4.0	.1155	F	.595	5.5	.1273	F	.573	7.5	.1353	F
.595	3.5	.1023	F	.644	5.0	.1226	F	.672	6.5	.1300	F	.627	7.0	.1434	F
.627	3.5	.1059	F	.702	5.0	.1300	F	.723	6.5	.1452	F	.702	8.0	.1540	F
.682	3.0	.1120	F	.723	4.5	.1320	F	.723	6.0	.1452	F	.723	6.5	.1580	F
.691	3.0	.1131	F	.757	4.0	.1372	F	.781	6.0	.1536	F	.723	6.5	.1580	F
.712	3.0	.1154	F	.757	3.5	.1372	F	.781	5.5	.1536	F	.769	6.0	.1653	F
.723	2.5	.1167	F	.769	3.0	.1380	F	.794	5.0	.1555	F	.794	6.0	.1693	F
.723	0.0	.1167	I	.794	0.0	.1422	I	.794	0.0	.1555	I	.794	0.0	.1693	I
.794	0.0	.1250	I	.821	0.0	.1458	I	.807	0.0	.1574	I	.821	0.0	.1736	I

26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL		26.54	.6500	TOTAL	
100.14		2.30		67.98		3.00		76.59		3.00		85.65		3.00	
	.0767				.0520				.0586				.0655		
.005	0.0	0.0000	I	.018	0.0	0.0000	I	.017	0.0	0.0000	I	.012	0.0	0.0000	I
.131	0.0	.0795	A	.239	0.0	.0650	A	.173	0.0	.0656	S	.167	0.0	.0726	R
.219	1.5	.0927	M	.363	1.0	.0785	S	.326	1.0	.0839	S	.244	1.5	.0827	S
.353	4.5	.1140	F	.419	1.0	.0847	S	.423	2.0	.0960	F	.390	3.0	.1027	F
.465	7.0	.1322	F	.476	2.0	.0910	M	.533	3.0	.1097	F	.521	5.0	.1210	F
.559	7.5	.1476	F	.539	2.5	.0980	F	.603	3.5	.1185	F	.595	6.0	.1314	F
.619	7.0	.1575	F	.611	3.0	.1060	F	.627	4.0	.1215	F	.627	6.0	.1359	F
.691	7.5	.1696	F	.672	3.5	.1130	F	.644	4.5	.1237	F	.682	6.0	.1430	F
.712	7.0	.1732	F	.682	3.0	.1141	F	.682	4.0	.1286	F	.712	5.5	.1482	F
.781	7.0	.1852	F	.712	2.5	.1176	F	.712	4.5	.1326	F	.712	6.0	.1482	F
.781	7.0	.1852	F	.734	2.5	.1202	F	.757	4.0	.1385	F	.769	5.5	.1567	F
.794	6.5	.1875	F	.757	2.5	.1229	F	.769	3.5	.1401	F	.781	5.5	.1585	F
.807	0.0	.1898	I	.757	0.0	.1229	I	.794	0.0	.1435	I	.794	0.0	.1605	I
.807	0.0	.1898	I	.794	0.0	.1273	I	.794	0.0	.1435	I	.794	0.0	.1605	I

26.54 90.60 .0694	.6500 3.00	TOTAL	26.54 104.98 .0804	.6500 3.00	TOTAL	30.77 74.01 .0565	.7000 1.00	TOTAL	30.77 85.62 .0655	.7000 1.00	TOTAL
.024	0.0	0.0000	I	.010	0.0	0.0000	I	.002	0.0	0.0000	I
.177	1.0	.0777	S	.163	1.0	.0802	S	.058	0.0	.0517	A
.326	2.5	.0990	F	.209	2.5	.1006	M	.063	0.0	.0521	A
.465	5.0	.1194	F	.451	5.5	.1361	F	.119	0.0	.0578	A
.508	6.5	.1376	F	.595	7.5	.1607	F	.169	0.0	.0632	A
.644	7.0	.1460	F	.682	7.5	.1760	F	.264	0.0	.0740	A
.712	6.5	.1564	F	.702	7.5	.1796	F	.353	2.0	.0846	S
.723	7.5	.1501	F	.734	7.5	.1853	F	.410	2.0	.0915	S
.734	6.5	.1596	F	.745	7.5	.1873	F	.487	3.0	.1000	M
.745	6.5	.1615	F	.781	7.5	.1939	F	.566	3.0	.1104	M
.807	6.5	.1714	F	.794	7.0	.1964	F	.620	3.5	.1100	F
.821	5.5	.1737	F	.794	7.0	.1964	F	.636	2.5	.1190	M
.821	0.0	.1737	I	.807	0.0	.1908	I	.636	0.0	.1190	I
.835	0.0	.1759	I	.821	0.0	.2014	I	.702	0.0	.1273	I

30.77 90.70 .0755	.7000 1.00	TOTAL	30.77 110.73 .0847	.7000 1.00	TOTAL	30.77 118.84 .0909	.7000 1.00	TOTAL	30.77 69.99 .0535	.7000 1.00	TOTAL
.001	0.0	0.0000	I	0.000	0.0	0.0000	I	0.000	0.0	0.0000	I
.012	0.0	.0630	A	.005	0.0	.0700	A	.003	0.0	.0746	A
.020	0.0	.0649	A	.008	0.0	.0704	A	.005	0.0	.0749	A
.043	0.0	.0667	A	.010	0.0	.0717	A	.006	0.0	.0750	A
.103	0.0	.0746	A	.033	0.0	.0738	A	.012	0.0	.0759	A
.190	2.0	.0870	S	.099	0.0	.0834	A	.037	0.0	.0795	A
.332	3.0	.1091	M	.210	3.0	.1014	S	.117	2.5	.0922	S
.471	6.0	.1314	F	.346	5.0	.1254	M	.224	4.0	.1111	M
.546	7.5	.1435	F	.471	8.0	.1479	F	.370	8.0	.1403	F
.626	6.5	.1568	F	.501	7.5	.1679	F	.515	7.0	.1668	F
.682	6.5	.1658	F	.654	8.0	.1814	F	.611	8.0	.1856	F
.702	6.5	.1691	F	.712	8.0	.1924	F	.682	7.5	.1997	F
.734	0.0	.1746	I	.712	0.0	.1924	I	.712	0.0	.2050	I
.782	0.0	.1829	I	.723	0.0	.1945	I	.769	0.0	.2176	I

30.77 85.25 .0652	.7000 1.00	TOTAL	30.77 96.41 .0738	.7000 1.00	TOTAL	30.77 104.93 .0803	.7000 1.00	TOTAL	30.77 119.21 .0913	.7000 1.00	TOTAL
.006	0.0	0.0000	I	.006	0.0	0.0000	I	.005	0.0	0.0000	I
.104	0.0	.0645	A	.157	0.0	.0802	A	.120	0.0	.0815	A
.205	0.0	.0771	A	.205	0.0	.0871	R	.151	0.0	.0862	A
.209	0.0	.0883	R	.264	2.0	.0960	S	.234	2.5	.0993	S
.353	2.0	.0971	S	.320	2.5	.1046	M	.310	3.5	.1119	M
.446	3.0	.1100	M	.423	3.0	.1207	M	.446	6.0	.1350	F
.553	3.5	.1249	F	.527	4.0	.1370	F	.560	6.0	.1545	F
.611	3.5	.1330	F	.611	7.0	.1503	F	.628	7.5	.1662	F
.672	4.5	.1417	F	.682	7.0	.1617	F	.702	7.5	.1793	F
.692	4.5	.1446	F	.712	6.5	.1667	F	.712	6.5	.1811	F
.712	4.0	.1475	F	.723	6.0	.1685	F	.745	6.5	.1870	F
.769	4.0	.1560	F	.757	6.0	.1742	F	.794	6.5	.1961	F
.782	0.0	.1579	I	.794	0.0	.1805	I	.808	0.0	.1987	I
.794	0.0	.1597	I	.808	0.0	.1829	I	.835	0.0	.2037	I

30.77	.7000	TOTAL	30.77	.7000	TOTAL	30.77	.7000	TOTAL	30.77	.7000	TOTAL
67.52	3.00		83.06	3.00		97.59	3.00		101.30	3.00	
.0516			.0636			.0747			.0775		
.020 0.0 0.0000 I			.020 0.0 0.0000 I			.013 0.0 0.0000 I			.011 0.0 0.0000 I		
.307 0.0 .0719 A			.256 0.0 .0816 A			.259 0.0 .0965 R			.190 1.5 .0893 S		
.382 0.0 .0801 A			.326 2.5 .0909 S			.346 2.5 .1101 S			.342 3.5 .1136 M		
.414 0.0 .0836 A			.441 3.0 .1064 S			.451 3.5 .1267 M			.461 3.5 .1332 F		
.436 0.0 .0860 A			.497 3.0 .1140 S			.527 4.0 .1308 M			.553 6.5 .1404 F		
.521 2.0 .0954 S			.559 3.5 .1224 F			.595 6.5 .1497 F			.677 7.0 .1693 F		
.595 2.5 .1036 S			.619 3.5 .1306 F			.636 6.5 .1563 F			.682 6.0 .1701 F		
.619 2.5 .1063 S			.682 3.5 .1394 S			.691 7.0 .1654 F			.702 7.5 .1736 F		
.672 3.0 .1123 S			.702 4.0 .1422 F			.691 7.0 .1654 F			.723 8.0 .1772 F		
.691 2.5 .1145 S			.723 3.5 .1452 M			.723 6.5 .1707 F			.734 7.0 .1792 F		
.734 3.0 .1194 S			.745 4.0 .1483 F			.734 6.0 .1726 F			.769 7.0 .1854 F		
.745 2.5 .1207 S			.745 3.5 .1483 F			.769 6.0 .1786 F			.781 7.0 .1875 F		
.745 0.0 .1207 I			.794 0.0 .1555 I			.794 0.0 .1829 I			.794 0.0 .1898 I		
.781 0.0 .1250 I			.807 0.0 .1574 I			.794 0.0 .1829 I			.794 0.0 .1898 I		

30.77	.7000	TOTAL	33.47	.7300	TOTAL	33.47	.7300	TOTAL	33.47	.7300	TOTAL
118.27	3.00		73.84	1.00		90.60	1.00		102.66	1.00	
.0905			.0564			.0693			.0765		
.010 0.0 0.0000 I			.003 0.0 0.0000 I			.001 0.0 0.0000 I			.000 0.0 0.0000 I		
.149 2.0 .0969 S			.063 0.0 .0520 A			.036 0.0 .0605 A			.013 0.0 .0658 A		
.251 4.0 .1152 M			.138 0.0 .0596 A			.009 0.0 .0668 A			.025 0.0 .0686 A		
.423 6.0 .1479 F			.173 0.0 .0634 A			.136 0.0 .0727 A			.003 0.0 .0750 A		
.546 7.5 .1715 F			.208 0.0 .0674 A			.180 0.0 .0797 A			.138 0.0 .0829 A		
.627 8.0 .1873 F			.254 0.0 .0727 A			.264 3.0 .0904 S			.217 3.0 .0950 S		
.686 8.0 .1990 F			.313 0.0 .0796 A			.360 3.5 .1043 S			.336 3.5 .1145 S		
.691 8.5 .2000 F			.423 2.5 .0928 S			.471 3.5 .1207 S			.441 3.5 .1320 M		
.723 8.5 .2065 F			.498 3.5 .1019 S			.566 3.5 .1348 F			.527 5.5 .1465 F		
.757 7.5 .2135 F			.596 2.5 .1138 M			.628 3.5 .1440 F			.611 4.0 .1607 F		
.769 7.5 .2160 F			.636 3.0 .1187 M			.682 3.5 .1523 F			.672 4.0 .1712 F		
.794 7.5 .2212 F			.672 3.0 .1232 F			.702 4.5 .1554 F			.682 5.5 .1729 F		
.794 0.0 .2212 I			.692 0.0 .1257 I			.712 0.0 .1569 I			.702 0.0 .1764 I		
.821 0.0 .2269 I			.723 0.0 .1296 I			.769 0.0 .1659 I			.734 0.0 .1821 I		

33.47	.7300	TOTAL	33.47	.7300	TOTAL	33.47	.7300	TOTAL	33.47	.7300	TOTAL
116.29	1.00		133.22	1.00		73.84	1.00		96.20	1.00	
.0889			.1018			.0564			.0736		
.000 0.0 0.0000 I			.000 0.0 0.0000 I			.006 0.0 0.0000 I			.006 0.0 0.0000 I		
.003 0.0 .0730 R			.000 0.0 .0836 A			.144 0.0 .0603 A			.127 0.0 .0759 A		
.010 0.0 .0740 A			.000 0.0 .0840 A			.229 0.0 .0698 A			.241 0.0 .0924 A		
.021 0.0 .0755 A			.003 0.0 .0839 A			.204 0.0 .0762 A			.301 2.5 .1015 S		
.029 0.0 .0767 A			.012 0.0 .0854 A			.316 0.0 .0800 A			.390 3.5 .1154 S		
.049 0.0 .0796 A			.020 0.0 .0866 A			.346 0.0 .0836 A			.492 4.0 .1313 M		
.146 3.5 .0950 S			.045 0.0 .0900 A			.390 0.0 .0898 A			.574 4.0 .1443 M		
.320 4.0 .1264 M			.102 3.0 .1009 S			.492 2.0 .1012 S			.619 5.0 .1514 F		
.423 8.0 .1458 F			.239 5.5 .1280 F			.560 3.5 .1094 S			.672 5.0 .1599 F		
.560 7.0 .1718 F			.432 7.5 .1695 F			.611 3.5 .1156 S			.702 5.0 .1649 F		
.645 7.5 .1802 F			.540 8.5 .1931 F			.663 3.5 .1221 S			.723 5.0 .1683 F		
.682 6.5 .1955 F			.619 8.5 .2105 F			.682 3.0 .1244 M			.723 5.0 .1683 F		
.723 0.0 .2036 I			.636 0.0 .2143 I			.692 0.0 .1257 I			.734 0.0 .1702 I		
.769 0.0 .2130 I			.702 0.0 .2292 I			.723 0.0 .1296 I			.782 0.0 .1783 I		

33.47	.7300	TOTAL		33.47	.7300	TOTAL		33.47	.7300	TOTAL		33.47	.7300	TOTAL	
105.01	1.60			105.00	1.60			124.85	1.60			74.16	3.00		
.0004				.0004				.0955				.0567			
.006	0.0	0.0000	I	.003	0.0	0.0000	I	.001	0.0	0.0000	I	.017	0.0	0.0000	I
.101	0.0	.0789	A	.063	0.0	.0735	A	.014	0.0	.0799	A	.236	0.0	.0706	A
.205	2.5	.0940	S	.157	0.0	.0872	A	.052	0.0	.0858	A	.353	0.0	.0844	A
.326	3.5	.1140	S	.249	2.5	.1019	S	.114	0.0	.0962	A	.398	0.0	.0898	A
.386	4.0	.1250	M	.339	3.5	.1170	M	.155	3.0	.1035	S	.423	2.5	.0929	S
.527	6.0	.1490	F	.476	4.0	.1403	M	.323	7.0	.1361	F	.492	2.5	.1012	S
.596	6.0	.1609	F	.553	6.5	.1535	F	.471	7.5	.1661	F	.553	2.5	.1086	S
.654	6.5	.1710	F	.645	7.5	.1694	F	.501	8.5	.1805	F	.611	3.0	.1157	S
.692	7.0	.1778	F	.702	7.5	.1796	F	.672	8.5	.2074	F	.672	3.0	.1232	M
.723	6.5	.1833	F	.712	6.0	.1813	F	.692	8.0	.2117	F	.692	3.0	.1257	M
.745	6.0	.1873	F	.745	6.5	.1873	F	.712	7.5	.2159	F	.723	3.0	.1297	M
.757	6.0	.1895	F	.769	6.5	.1917	F	.734	7.5	.2207	F	.734	3.0	.1311	F
.782	0.0	.1941	I	.794	0.0	.1964	I	.745	0.0	.2231	I	.757	0.0	.1341	I
.821	0.0	.2014	I	.821	0.0	.2014	I	.794	0.0	.2330	I	.794	0.0	.1389	I

33.47	.7300	TOTAL		33.47	.7300	TOTAL		33.47	.7300	TOTAL		33.47	.7300	TOTAL	
86.49	3.00			97.79	3.00			117.04	3.00			122.03	3.00		
.0662				.0749				.0896				.0940			
.017	0.0	0.0000	I	.012	0.0	0.0000	I	.006	0.0	0.0000	I	.010	0.0	0.0000	I
.239	0.0	.0820	A	.106	3.0	.0854	S	.142	3.0	.0947	S	.136	3.5	.0982	S
.342	0.0	.0970	A	.363	3.0	.1126	S	.275	4.0	.1105	M	.289	3.5	.1269	M
.386	2.5	.1031	S	.437	3.5	.1244	M	.419	4.5	.1456	F	.432	6.0	.1552	F
.441	3.0	.1109	S	.540	3.5	.1407	M	.527	7.0	.1662	F	.527	7.5	.1742	F
.540	3.0	.1240	S	.603	5.5	.1500	F	.619	7.0	.1839	F	.628	0.0	.1945	F
.603	3.0	.1338	S	.636	6.0	.1562	F	.628	7.0	.1856	F	.702	8.0	.2098	F
.654	3.5	.1411	M	.682	6.5	.1637	F	.702	7.5	.2002	F	.712	8.5	.2119	F
.692	3.5	.1467	F	.723	6.0	.1706	F	.745	7.5	.2089	F	.734	8.5	.2166	F
.712	3.5	.1497	F	.734	5.5	.1724	F	.769	7.0	.2130	F	.734	8.5	.2166	F
.723	3.5	.1513	F	.757	5.5	.1763	F	.782	7.0	.2165	F	.769	7.5	.2241	F
.757	3.5	.1564	F	.782	5.5	.1806	F	.794	6.5	.2189	F	.782	7.0	.2269	F
.782	0.0	.1602	I	.794	0.0	.1827	I	.800	0.0	.2210	I	.794	0.0	.2295	I
.794	0.0	.1620	I	.835	0.0	.1898	I	.821	0.0	.2246	I	.835	0.0	.2384	I

36.20	.7600	TOTAL		36.20	.7600	TOTAL		36.20	.7600	TOTAL		36.20	.7600	TOTAL	
97.00	1.00			109.35	1.00			126.56	1.00			131.85	1.00		
.0747				.0836				.0967				.1000			
.001	0.0	0.0000	I	0.000	0.0	0.0000	I	0.000	0.0	0.0000	I	0.000	0.0	0.0000	I
.046	0.0	.0660	A	.029	0.0	.0724	A	.011	0.0	.0809	A	.003	0.0	.0830	A
.073	0.0	.0702	A	.047	0.0	.0749	A	.012	0.0	.0811	A	.004	0.0	.0832	A
.102	0.0	.0741	A	.073	0.0	.0786	A	.027	0.0	.0834	A	.007	0.0	.0837	A
.127	0.0	.0775	A	.080	0.0	.0796	A	.039	0.0	.0852	A	.020	0.0	.0857	A
.177	0.0	.0847	A	.153	0.0	.0909	A	.090	3.5	.0951	S	.029	0.0	.0872	A
.262	0.0	.0976	A	.281	3.5	.1125	S	.217	3.5	.1172	S	.109	3.5	.1011	S
.360	3.0	.1130	S	.378	3.5	.1297	S	.360	3.5	.1461	M	.217	3.5	.1221	S
.423	3.5	.1231	S	.466	3.5	.1454	M	.492	7.0	.1734	F	.342	4.5	.1404	F
.514	3.0	.1377	M	.540	4.0	.1587	F	.581	7.0	.1919	F	.466	7.0	.1750	F
.566	2.5	.1460	M	.603	4.0	.1701	F	.628	6.5	.2018	F	.581	7.0	.1999	F
.619	3.0	.1546	F	.645	5.5	.1778	F	.682	6.5	.2133	F	.636	7.0	.2120	F
.645	0.0	.1589	I	.672	0.0	.1828	I	.702	0.0	.2177	I	.692	0.0	.2245	I
.692	0.0	.1667	I	.685	0.0	.1852	I	.723	0.0	.2222	I	.723	0.0	.2315	I

36.28	.7600	TOTAL	36.25	.7600	TOTAL	36.28	.7600	TOTAL	36.28	.7600	TOTAL
139.92	1.00		96.55	1.00		112.41	1.00		123.16	1.00	
	.1069			.0738			.0860			.0942	
.0000	0.0	0.0000 I	.006	0.0	0.0000 I	.005	0.0	0.0000 I	.003	0.0	0.0000 I
.0000	0.0	.0079 A	.140	0.0	.0782 A	.114	0.0	.0867 A	.069	0.0	.0372 A
.001	0.0	.0079 A	.215	0.0	.0891 A	.234	0.0	.1060 R	.135	0.0	.0984 A
.003	0.0	.0882 A	.219	0.0	.0897 A	.298	3.0	.1101 S	.215	0.0	.1130 R
.006	0.0	.0887 A	.244	0.0	.0935 A	.340	3.5	.1294 M	.336	3.5	.1366 M
.012	0.0	.0897 A	.346	2.5	.1092 S	.487	4.0	.1526 M	.471	5.0	.1635 F
.030	3.0	.0942 S	.432	3.0	.1220 S	.588	4.5	.1712 F	.580	6.0	.1870 F
.075	3.0	.1009 S	.521	3.5	.1368 S	.628	5.0	.1787 F	.636	7.0	.1968 F
.194	5.0	.1240 M	.588	3.5	.1475 M	.672	5.0	.1870 F	.692	6.5	.2004 F
.329	7.5	.1547 F	.628	3.5	.1539 M	.702	5.5	.1927 F	.712	6.5	.2126 F
.487	7.5	.1907 F	.682	3.5	.1627 M	.723	5.5	.1960 F	.757	6.0	.2222 F
.588	8.0	.2140 F	.712	3.5	.1676 M	.734	5.0	.1989 F	.782	6.0	.2276 F
.636	0.0	.2252 I	.723	0.0	.1695 I	.757	0.0	.2034 I	.794	0.0	.2302 I
.692	0.0	.2384 I	.734	0.0	.1713 I	.782	0.0	.2083 I	.821	0.0	.2361 I

36.28	.7600	TOTAL	36.28	.7600	TOTAL	36.28	.7600	TOTAL	36.28	.7600	TOTAL
140.35	1.60		143.59	1.60		96.37	3.00		100.07	3.00	
	.1074			.1099			.0737			.0766	
.003	0.0	0.0000 I	.001	0.0	0.0000 I	.017	0.0	0.0000 I	.014	0.0	0.0000 I
.064	0.0	.0906 A	.047	0.0	.0976 A	.231	0.0	.0910 A	.222	0.0	.0930 A
.135	0.0	.1122 R	.096	0.0	.1069 A	.342	0.0	.1001 A	.332	0.0	.1105 A
.201	3.5	.1260 S	.163	3.0	.1206 M	.378	0.0	.1137 A	.368	0.0	.1150 R
.342	6.0	.1572 F	.313	6.5	.1540 F	.406	3.0	.1181 S	.441	3.5	.1282 M
.492	7.0	.1914 F	.481	7.5	.1931 F	.476	3.0	.1290 S	.533	3.5	.1432 M
.596	7.0	.2153 F	.596	8.0	.2201 F	.553	3.0	.1411 S	.619	3.5	.1573 M
.654	8.0	.2288 F	.672	8.5	.2383 F	.596	3.5	.1480 S	.654	4.0	.1632 M
.712	7.5	.2426 F	.702	8.5	.2456 F	.663	3.0	.1587 M	.702	4.0	.1713 F
.734	7.5	.2480 F	.723	8.0	.2508 F	.682	3.0	.1618 M	.723	4.0	.1749 F
.745	7.0	.2506 F	.745	8.0	.2562 F	.723	3.0	.1686 M	.734	4.0	.1768 F
.769	7.0	.2565 F	.782	7.5	.2655 F	.757	3.0	.1743 M	.769	4.5	.1829 F
.794	0.0	.2627 I	.808	0.0	.2722 I	.782	0.0	.1785 I	.794	0.0	.1873 I
.808	0.0	.2662 I	.821	0.0	.2755 I	.794	0.0	.1806 I	.808	0.0	.1898 I

36.28	.7600	TOTAL	36.28	.7300	TOTAL	36.28	.7600	TOTAL	39.57	.7938	TOTAL
126.92	3.00		140.67	3.00		147.21	3.00		102.39	1.00	
	.0971			.1077			.1127			.0782	
.011	0.0	0.0000 I	.007	0.0	0.0000 I	.007	0.0	0.0000 I	.002	0.0	0.0000 I
.161	3.0	.1063 S	.147	3.5	.1148 S	.110	2.5	.1124 S	.038	0.0	.0690 A
.289	3.5	.1314 S	.289	4.5	.1454 F	.229	5.0	.1384 F	.104	0.0	.0780 A
.419	3.0	.1580 M	.437	5.5	.1790 F	.406	6.0	.1800 F	.138	0.0	.0830 A
.546	6.5	.1843 F	.566	8.0	.2085 F	.546	7.5	.2136 F	.184	0.0	.0980 A
.628	6.5	.2014 F	.636	7.5	.2247 F	.603	7.5	.2273 F	.219	0.0	.0955 A
.692	6.5	.2151 F	.692	7.5	.2380 F	.682	7.5	.2468 F	.295	0.0	.1078 A
.712	6.5	.2194 F	.723	7.5	.2455 F	.712	8.0	.2543 F	.306	2.5	.1229 R
.723	7.0	.2218 F	.745	8.0	.2508 F	.723	8.5	.2571 F	.437	3.0	.1315 S
.745	6.5	.2267 F	.757	7.5	.2538 F	.757	7.5	.2658 F	.492	3.5	.1407 S
.769	6.5	.2320 F	.782	7.5	.2599 F	.769	7.5	.2689 F	.588	3.5	.1569 S
.782	6.5	.2349 F	.808	7.5	.2664 F	.782	7.5	.2722 F	.611	3.5	.1608 S
.794	0.0	.2376 I	.821	0.0	.2697 I	.808	0.0	.2790 I	.628	0.0	.1638 I
.808	0.0	.2408 I	.835	0.0	.2732 I	.821	0.0	.2824 I	.645	0.0	.1667 I

39.57 117.93 .0901	.7938 1.00	TOTAL	39.57 129.20 .0900	.7938 1.00	TOTAL	39.57 137.18 .1047	.7938 1.00	TOTAL	39.57 158.69 .1213	.7938 1.00	TOTAL
.001	0.0	0.0000 I	.000	0.0	0.0000 I	.000	0.0	0.0000 I	.000	0.0	0.0000 I
.022	0.0	.0771 A	.015	0.0	.0832 A	.000	0.0	.0869 A	.001	0.0	.0997 A
.053	0.0	.0017 A	.033	0.0	.0061 A	.001	0.0	.0062 A	.004	0.0	.1002 A
.006	0.0	.0068 A	.063	0.0	.0910 A	.003	0.0	.0065 A	.010	0.0	.1014 A
.127	0.0	.0936 A	.133	0.0	.1034 A	.007	0.0	.0071 A	.022	0.0	.1036 A
.173	0.0	.1015 A	.226	2.5	.1215 S	.019	0.0	.0091 A	.056	0.0	.1104 A
.246	0.0	.1140 A	.332	2.5	.1433 S	.027	0.0	.0905 A	.131	2.5	.1267 S
.326	3.0	.1299 S	.419	4.0	.1616 F	.133	3.0	.1100 S	.219	4.5	.1476 M
.432	3.5	.1503 S	.503	4.0	.1794 F	.215	3.5	.1260 S	.378	6.0	.1801 F
.490	3.5	.1630 M	.611	4.0	.2023 F	.353	3.5	.1570 M	.492	6.0	.2176 F
.580	3.5	.1805 M	.645	4.5	.2097 F	.461	4.5	.1812 F	.596	6.0	.2448 F
.619	4.0	.1866 F	.682	6.0	.2170 F	.553	6.5	.2019 F	.628	7.0	.2533 F
.645	0.0	.1917 I	.702	0.0	.2222 I	.619	0.0	.2169 I	.682	0.0	.2677 I
.682	0.0	.1991 I	.723	0.0	.2269 I	.682	0.0	.2315 I	.702	0.0	.2732 I

39.57 107.00 .0910	.7938 1.60	TOTAL	39.57 119.64 .0915	.7938 1.60	TOTAL	39.57 135.14 .1035	.7938 1.60	TOTAL	39.57 147.21 .1127	.7938 1.60	TOTAL
.006	0.0	0.0000 I	.004	0.0	0.0000 I	.004	0.0	0.0000 I	.003	0.0	0.0000 I
.155	0.0	.0090 A	.115	0.0	.0923 A	.109	0.0	.1030 A	.053	0.0	.1012 A
.249	0.0	.1044 A	.231	0.0	.1129 A	.210	0.0	.1231 A	.146	2.0	.1200 R
.292	0.0	.1117 A	.270	0.0	.1217 A	.209	2.0	.1390 R	.241	2.5	.1411 S
.323	0.0	.1171 A	.313	0.0	.1204 A	.363	3.5	.1559 M	.356	4.0	.1601 M
.382	0.0	.1273 A	.414	4.0	.1479 M	.481	5.0	.1817 F	.490	6.0	.2020 F
.446	0.0	.1305 A	.490	4.0	.1643 M	.501	6.0	.2030 F	.603	6.5	.2273 F
.533	3.5	.1537 M	.596	5.0	.1835 F	.654	7.5	.2202 F	.672	7.5	.2443 F
.596	3.5	.1640 M	.672	4.5	.1986 F	.712	6.5	.2335 F	.723	7.0	.2571 F
.628	3.5	.1705 M	.702	4.5	.2047 F	.734	6.0	.2386 F	.757	6.5	.2658 F
.672	3.5	.1784 M	.734	4.5	.2113 F	.757	6.0	.2440 F	.782	6.0	.2722 F
.692	3.5	.1821 M	.745	5.0	.2136 F	.782	6.5	.2499 F	.794	6.0	.2754 F
.712	0.0	.1857 I	.769	0.0	.2186 I	.800	0.0	.2561 I	.800	0.0	.2790 I
.734	0.0	.1890 I	.800	0.0	.2269 I	.821	0.0	.2593 I	.821	0.0	.2824 I

39.57 156.92 .1201	.7938 1.60	TOTAL	39.57 92.20 .0706	.7938 3.00	TOTAL	39.57 103.02 .0794	.7938 3.00	TOTAL	39.57 122.04 .0934	.7938 3.00	TOTAL
.000	0.0	0.0000 I	.019	0.0	0.0000 I	.019	0.0	0.0000 I	.017	0.0	0.0000 I
.021	0.0	.1016 A	.204	0.0	.0952 A	.273	0.0	.1049 A	.239	0.0	.1167 A
.060	0.0	.1109 A	.356	0.0	.1060 A	.360	0.0	.1194 A	.342	0.0	.1367 A
.114	3.0	.1207 S	.306	0.0	.1105 A	.390	0.0	.1250 A	.302	2.5	.1446 S
.217	3.0	.1445 M	.406	0.0	.1135 A	.423	2.5	.1300 S	.432	3.5	.1545 S
.360	6.5	.1801 F	.451	0.0	.1203 A	.503	2.5	.1435 S	.546	3.5	.1772 M
.487	6.5	.2125 F	.521	2.5	.1300 S	.560	2.5	.1532 S	.619	3.5	.1919 M
.611	0.0	.2443 F	.566	3.0	.1376 S	.611	3.5	.1619 M	.663	4.0	.2000 F
.682	7.5	.2630 F	.611	3.0	.1445 S	.672	3.5	.1725 M	.702	4.0	.2009 F
.723	7.5	.2739 F	.645	3.0	.1490 S	.702	3.5	.1770 M	.734	3.5	.2156 F
.745	7.0	.2799 F	.672	3.0	.1540 S	.723	3.5	.1816 M	.769	4.0	.2231 F
.769	7.5	.2865 F	.692	3.0	.1571 S	.734	3.0	.1835 M	.782	4.0	.2259 F
.782	0.0	.2901 I	.702	0.0	.1507 I	.757	0.0	.1877 I	.794	0.0	.2285 I
.821	0.0	.3009 I	.723	0.0	.1620 I	.794	0.0	.1945 I	.800	0.0	.2315 I

39.57 136.32 .1044	.7938 3.00	TOTAL		39.57 149.62 .1145	.7938 3.00	TOTAL	
.012	0.0	0.0000	I	.010	0.0	0.0000	I
.215	2.5	.1252	S	.146	0.0	.1219	R
.310	2.5	.1456	S	.270	3.0	.1502	H
.437	3.0	.1736	H	.410	3.5	.1840	H
.533	5.0	.1949	F	.521	6.5	.2110	F
.611	5.5	.2124	F	.619	6.5	.2350	F
.672	6.0	.2263	F	.682	6.5	.2508	F
.723	7.0	.2381	F	.712	7.5	.2585	F
.745	6.0	.2433	F	.734	7.0	.2641	F
.769	5.5	.2490	F	.757	7.0	.2701	F
.794	6.0	.2550	F	.782	7.0	.2767	F
.808	6.0	.2584	F	.794	7.0	.2799	F
.821	0.0	.2616	I	.808	0.0	.2836	I
.821	0.0	.2616	I	.821	0.0	.2871	I

b) Experimentos realizados com refluxo parcial:

AA.AA		B.BBBB		CCCCCCC	
DDD.DD				E.EE	
F1				F2	
Refv.	Refv.	Refv.	Refv.	Refv.	Refv.
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2
G.GGG	HH.H	I.IIIII		J	
12	12	12	12	12	12
Conds.	Conds.	Conds.	Conds.	Conds.	Conds.

- A = Area livre de escoam. (%)
B = Diam. do orifício (cm)
C = Rel. de refluxo (total ou parcial)
D = Vel. sup. do vapor que sai do prato 12 (cm/s)
E = Conc. inicial no reserv. (% fr. m. de etanol)
F1 = Vazão molar do vapor (moles/s)
F2 = Vazão molar do líquido (moles/s)
G = Conc. do líq. nos pratos (fr. m. de etanol)
H = Altura da dispersão (cm)
I = Vel. sup. do líq. que deixa o prato (cm/s)
J = Regime de escoamento
I = não observável; A = abaixo da retenção; S =

spray; C = celular; T = misto(C+S); M = transição froth-spray; F = froth. Observação: para o refervedor, prato 12 e o condensador, a altura da dispersão e o regime de escoamento não eram observáveis.

26.54 .6500 PARCIAL	26.54 .6500 PARCIAL	26.54 .6500 PARCIAL	26.54 .6500 PARCIAL
63.65 1.00	66.58 1.00	69.34 3.00	113.08 3.00
.0481 .0455	.0504 .0516	.0673 .0331	.0876 .0710
.002 0.0 0.0000 I	0.000 0.0 0.0000 I	.020 0.0 0.0000 I	.012 0.0 0.0000 I
.003 2.0 .0381 S	0.000 0.0 .0431 A	.021 0.0 .0209 A	.012 1.5 .0607 S
.003 2.0 .0381 S	0.000 2.0 .0431 S	.021 2.5 .0209 S	.012 2.5 .0607 S
.003 2.0 .0381 S	0.000 2.0 .0431 S	.021 2.5 .0209 S	.012 2.5 .0607 S
.003 2.0 .0381 S	0.000 2.0 .0431 S	.021 2.5 .0209 S	.012 2.5 .0607 S
.003 2.0 .0381 S	0.000 2.0 .0431 S	.021 2.5 .0209 S	.015 3.0 .0611 S
.004 2.0 .0382 S	0.000 2.0 .0431 S	.021 2.5 .0209 S	.021 3.0 .0619 M
.004 2.0 .0382 S	0.000 2.0 .0431 S	.021 2.5 .0209 S	.043 3.5 .0649 M
.004 2.0 .0382 S	.002 2.5 .0432 M	.022 2.5 .0209 S	.115 3.5 .0746 M
.006 2.5 .0384 S	.012 0.0 .0442 A	.023 2.5 .0290 S	.272 8.0 .0766 F
.020 0.0 .0396 A	.033 0.0 .0462 R	.027 2.5 .0292 S	.402 8.0 .1153 F
.060 2.5 .0437 M	.119 2.5 .0547 M	.035 2.5 .0310 S	.533 8.5 .1346 F
.229 0.0 .0500 I	.201 0.0 .0712 I	.159 0.0 .0376 I	.619 0.0 .1474 I
.437 0.0 .0772 I	.498 0.0 .0941 I	.406 0.0 .0540 I	.691 0.0 .1582 I

26.54 .6500 PARCIAL	26.54 .6500 PARCIAL	30.77 .7000 PARCIAL	30.77 .7000 PARCIAL
118.56 3.00	100.29 3.00	77.37 1.00	104.73 1.00
.0906 .0772	.0029 .0781	.0536 .0520	.0790 .0799
.000 0.0 0.0000 I	.010 0.0 0.0000 I	.004 0.0 0.0000 I	.001 0.0 0.0000 I
.000 1.5 .0654 S	.086 0.0 .0778 A	.004 2.5 .0444 S	.001 3.0 .0667 S
.010 2.5 .0657 M	.169 1.0 .0903 S	.004 2.5 .0444 S	.001 3.0 .0667 S
.011 4.0 .0659 F	.256 4.0 .1038 F	.004 2.5 .0444 S	.001 3.0 .0667 S
.017 2.5 .0667 F	.423 7.5 .1303 F	.005 3.0 .0445 S	.001 3.0 .0667 S
.030 2.5 .0698 F	.553 8.0 .1514 F	.005 3.0 .0445 S	.003 0.0 .0670 A
.107 4.0 .0799 F	.611 0.0 .1609 F	.005 3.0 .0445 S	.007 0.0 .0676 A
.272 9.0 .1050 F	.672 8.5 .1707 F	.005 3.0 .0445 S	.012 0.0 .0684 A
.427 9.0 .1293 F	.702 7.5 .1759 F	.005 0.0 .0445 A	.039 0.0 .0724 A
.539 9.0 .1473 F	.723 7.5 .1794 F	.036 0.0 .0475 A	.072 0.0 .0774 A
.619 8.0 .1602 F	.723 7.5 .1794 F	.109 2.5 .0549 S	.186 3.5 .0951 M
.682 7.5 .1705 F	.745 7.0 .1830 F	.215 3.5 .0650 F	.316 6.0 .1159 F
.712 0.0 .1754 I	.769 0.0 .1870 I	.289 0.0 .0736 I	.471 0.0 .1412 I
.781 0.0 .1867 I	.800 0.0 .1935 I	.476 0.0 .0930 I	.581 0.0 .1596 I

30.77 .7000 PARCIAL	30.77 .7000 PARCIAL	30.77 .7000 PARCIAL	30.77 .7000 PARCIAL
97.08 1.00	100.00 3.00	114.75 3.00	113.10 3.00
.0746 .0744	.0025 .0671	.0077 .0775	.0066 .0010
0.000 0.0 0.0000 I	.010 0.0 0.0000 I	.012 0.0 0.0000 I	.012 0.0 0.0000 I
0.000 3.0 .0620 S	.014 0.0 .0577 A	.035 0.0 .0650 A	.098 0.0 .0826 A
0.000 3.0 .0620 S	.016 0.0 .0580 A	.055 0.0 .0726 A	.199 0.0 .0925 A
0.000 3.0 .0620 S	.023 0.0 .0588 A	.099 0.0 .0791 A	.270 3.0 .1100 M
.001 3.0 .0621 S	.027 0.0 .0593 A	.135 2.5 .0845 S	.419 6.0 .1345 F
.002 0.0 .0623 A	.057 0.0 .0631 A	.273 4.0 .1056 M	.527 8.0 .1527 F
.004 0.0 .0626 A	.114 2.5 .0705 S	.402 4.0 .1259 M	.611 7.0 .1669 F
.010 0.0 .0634 A	.194 3.5 .0810 M	.509 8.0 .1431 F	.663 8.0 .1750 F
.022 0.0 .0651 A	.310 7.0 .0965 F	.574 8.0 .1536 F	.692 8.5 .1800 F
.062 0.0 .0707 A	.451 7.0 .1159 F	.628 7.0 .1624 F	.712 7.0 .1843 F
.153 3.0 .0837 M	.521 7.0 .1257 F	.682 7.5 .1712 F	.782 7.0 .1963 F
.304 4.0 .1061 F	.596 7.0 .1362 F	.702 7.0 .1745 F	.794 6.5 .1984 F
.487 0.0 .1340 I	.645 0.0 .1431 I	.723 0.0 .1780 I	.794 0.0 .1984 I
.603 0.0 .1520 I	.702 0.0 .1512 I	.734 0.0 .1790 I	.821 0.0 .2031 I

33.47	.7300	PARCIAL	33.47	.7300	PARCIAL	33.47	.7300	PARCIAL	33.47	.7300	PARCIAL
97.48	1.00		105.18	1.00		101.93	1.00		122.95	3.00	
.0737	.0647		.0501	.0769		.0775	.0752		.0940	.0700	
.004	0.0	0.0000 I	.001	0.0	0.0000 I	0.000	0.0	0.0000 I	.013	0.0	0.0000 I
.004	3.0	.0544 S	.001	3.5	.0642 S	.001	3.5	.0628 S	.017	0.0	.0674 A
.004	3.0	.0544 S	.002	0.0	.0644 A	.001	0.0	.0628 A	.021	0.0	.0680 A
.004	3.5	.0544 S	.002	0.0	.0644 A	.001	0.0	.0628 A	.026	0.0	.0687 A
.004	3.5	.0544 S	.004	0.0	.0647 A	.001	0.0	.0628 A	.050	0.0	.0723 A
.005	0.0	.0545 A	.004	0.0	.0647 A	.002	0.0	.0630 A	.101	3.5	.0799 S
.005	0.0	.0545 A	.005	0.0	.0648 A	.003	0.0	.0631 A	.177	3.5	.0914 M
.006	0.0	.0547 A	.010	0.0	.0655 A	.006	0.0	.0635 A	.204	5.0	.1000 F
.007	0.0	.0548 A	.010	0.0	.0667 A	.013	0.0	.0645 A	.302	7.5	.1235 F
.015	0.0	.0557 A	.076	0.0	.0751 A	.042	0.0	.0686 A	.498	7.0	.1421 F
.058	0.0	.0610 A	.173	3.0	.0896 M	.107	3.0	.0779 S	.501	7.0	.1557 F
.102	3.0	.0664 S	.310	6.0	.1106 F	.212	4.0	.0934 M	.611	7.0	.1606 F
.231	0.0	.0828 I	.407	0.0	.1305 I	.419	0.0	.1249 I	.682	0.0	.1723 I
.481	0.0	.1157 I	.619	0.0	.1597 I	.611	0.0	.1550 I	.734	0.0	.1809 I

33.47	.7300	PARCIAL	33.47	.7300	PARCIAL	36.28	.7600	PARCIAL	36.28	.7600	PARCIAL
120.35	3.00		123.33	3.00		98.73	1.00		103.10	1.00	
.0921	.0806		.0944	.0889		.0673	.0608		.0786	.0765	
.018	0.0	0.0000 I	.006	0.0	0.0000 I	.002	0.0	0.0000 I	0.000	0.0	0.0000 I
.029	0.0	.0715 A	.050	0.0	.0838 A	.002	0.0	.0509 A	0.000	0.0	.0639 A
.069	0.0	.0776 A	.167	0.0	.1025 R	.002	3.0	.0509 S	0.000	3.0	.0639 S
.136	0.0	.0800 A	.219	3.0	.1116 M	.002	3.0	.0509 S	0.000	3.0	.0639 S
.173	3.5	.0938 S	.378	6.5	.1401 F	.002	3.0	.0509 S	0.000	3.0	.0639 S
.209	4.5	.1124 F	.521	7.5	.1664 F	.003	3.0	.0510 S	.001	3.0	.0639 S
.437	7.0	.1367 F	.619	7.0	.1846 F	.004	3.0	.0511 S	.001	3.0	.0639 S
.546	7.5	.1549 F	.682	8.0	.1965 F	.005	3.0	.0512 S	.010	3.0	.0652 M
.611	7.5	.1659 F	.712	8.0	.2021 F	.014	4.0	.0523 S	.040	3.0	.0695 M
.645	7.0	.1717 F	.734	7.0	.2063 F	.040	2.5	.0552 R	.136	3.0	.0836 M
.702	7.5	.1814 F	.769	7.0	.2129 F	.109	3.0	.0632 S	.273	4.5	.1044 F
.723	7.0	.1850 F	.794	6.5	.2177 F	.234	4.0	.0782 F	.428	7.5	.1285 F
.745	0.0	.1888 I	.808	0.0	.2203 I	.346	0.0	.0919 I	.533	0.0	.1452 I
.769	0.0	.1929 I	.835	0.0	.2255 I	.546	0.0	.1170 I	.636	0.0	.1617 I

36.28	.7600	PARCIAL	36.28	.7600	PARCIAL	36.28	.7600	PARCIAL	36.28	.7600	PARCIAL
109.06	1.00		135.44	1.00		140.12	1.00		146.55	1.00	
.0838	.0829		.1033	.0938		.1132	.1109		.1120	.1095	
0.000	0.0	0.0000 I	.005	0.0	0.0000 I	.001	0.0	0.0000 I	0.000	0.0	0.0000 I
0.000	0.0	.0692 A	.005	3.5	.0784 S	.002	0.0	.0929 A	.003	0.0	.0918 A
0.000	3.0	.0692 S	.005	3.5	.0784 S	.003	0.0	.0931 A	.005	0.0	.0923 A
0.000	3.0	.0692 S	.005	3.5	.0784 S	.008	0.0	.0941 A	.012	0.0	.0937 A
0.000	3.0	.0692 S	.005	3.5	.0784 S	.010	2.5	.0945 M	.024	0.0	.0961 A
.001	3.0	.0692 S	.006	4.0	.0786 S	.039	3.5	.1005 M	.067	3.5	.1050 S
.002	3.0	.0694 S	.012	3.5	.0796 S	.153	4.5	.1240 M	.184	4.0	.1299 M
.012	2.5	.0709 M	.033	4.0	.0833 S	.270	7.5	.1506 F	.298	0.0	.1547 F
.047	2.5	.0764 M	.096	4.0	.0944 S	.432	8.5	.1871 F	.471	0.5	.1935 F
.140	2.5	.0912 M	.236	6.0	.1199 F	.540	0.0	.2120 F	.553	0.0	.2122 F
.270	5.0	.1138 F	.398	7.5	.1504 F	.596	0.0	.2250 F	.661	0.0	.2371 F
.441	7.5	.1414 F	.492	0.0	.1685 F	.636	0.0	.2344 F	.654	7.5	.2355 F
.546	0.0	.1595 I	.574	0.0	.1844 I	.682	0.0	.2452 I	.692	0.0	.2443 I
.645	0.0	.1767 I	.645	0.0	.1983 I	.702	0.0	.2499 I	.734	0.0	.2540 I

36.28 .7600 PARCIAL	36.28 .7600 PARCIAL	36.28 .7600 PARCIAL	39.57 .7938 PARCIAL
135.36 3.00	141.65 3.00	153.09 3.00	105.22 1.00
.1035 .0853	.1003 .0955	.1171 .1101	.0798 .0738
.019 0.0 0.0000 I	.010 0.0 0.0000 I	.006 0.0 0.0000 I	.003 0.0 0.0000 I
.019 0.0 .0741 A	.038 0.0 .0864 A	.020 0.0 .1003 A	.003 3.0 .0619 S
.022 0.0 .0746 A	.044 0.0 .0874 A	.129 0.0 .1107 R	.003 3.0 .0619 S
.025 0.0 .0751 A	.007 0.0 .0953 A	.236 3.0 .1419 M	.003 3.0 .0619 S
.031 0.0 .0761 R	.149 2.5 .1067 M	.329 7.0 .1625 F	.003 3.0 .0619 S
.055 3.5 .0799 S	.256 5.5 .1269 F	.471 7.0 .1945 F	.004 0.0 .0621 A
.107 3.5 .0804 S	.402 6.5 .1532 F	.596 7.0 .2232 F	.005 0.0 .0622 A
.259 6.0 .1139 F	.503 7.5 .1751 F	.636 7.5 .2325 F	.008 0.0 .0626 A
.367 7.0 .1326 F	.596 8.0 .1937 F	.682 8.0 .2432 F	.010 0.0 .0640 A
.492 7.5 .1545 F	.628 7.5 .2001 F	.712 7.5 .2502 F	.060 0.0 .0690 A
.588 7.0 .1717 F	.654 7.5 .2053 F	.723 7.5 .2528 F	.109 2.5 .0767 S
.628 7.0 .1788 F	.702 7.0 .2151 F	.734 7.5 .2554 F	.215 3.5 .0921 M
.682 0.0 .1886 I	.723 0.0 .2193 I	.745 0.0 .2580 I	.320 0.0 .1076 I
.723 0.0 .1968 I	.745 0.0 .2238 I	.794 0.0 .2695 I	.498 0.0 .1346 I

39.57 .7938 PARCIAL	39.57 .7938 PARCIAL	39.57 .7938 PARCIAL	39.57 .7938 PARCIAL
131.60 1.00	140.72 1.00	130.82 1.00	151.64 1.00
.1002 .0952	.1073 .1037	.0998 .0869	.1160 .1091
0.000 0.0 0.0000 I	0.000 0.0 0.0000 I	.005 0.0 0.0000 I	.003 0.0 0.0000 I
0.000 2.5 .0795 S	0.000 0.0 .0866 A	.005 0.0 .0732 A	.010 0.0 .0930 A
.001 2.5 .0795 S	0.000 0.0 .0864 A	.005 3.0 .0732 S	.032 0.0 .0975 A
.001 3.0 .0795 S	.001 3.0 .0866 S	.005 3.0 .0732 S	.057 3.0 .1026 S
.002 0.0 .0797 A	.003 0.0 .0870 A	.006 3.0 .0734 S	.119 3.0 .1156 S
.003 0.0 .0799 A	.005 0.0 .0873 A	.007 3.0 .0735 S	.259 4.5 .1457 M
.006 0.0 .0804 A	.013 0.0 .0889 A	.017 3.0 .0751 S	.306 6.5 .1730 F
.019 0.0 .0827 A	.027 0.0 .0916 A	.037 0.0 .0784 A	.492 8.0 .1976 F
.035 0.0 .0856 A	.095 3.0 .1050 S	.086 3.0 .0845 S	.596 7.5 .2213 F
.102 0.0 .0977 A	.180 3.5 .1230 S	.167 3.0 .1001 S	.636 7.5 .2305 F
.188 3.0 .1137 S	.304 4.5 .1470 M	.281 4.0 .1190 F	.682 7.0 .2412 F
.310 5.0 .1369 F	.451 7.0 .1789 F	.432 6.5 .1445 F	.702 7.5 .2458 F
.446 0.0 .1634 I	.546 0.0 .1994 I	.540 0.0 .1660 I	.723 0.0 .2507 I
.628 0.0 .1996 I	.672 0.0 .2269 I	.672 0.0 .1901 I	.782 0.0 .2644 I

39.57 .7938 PARCIAL	39.57 .7938 PARCIAL	39.57 .7938 PARCIAL	39.57 .7938 PARCIAL
149.36 1.00	134.93 3.00	145.34 3.00	149.49 3.00
.1143 .1091	.1031 .0839	.1111 .0960	.1144 .1093
.002 0.0 0.0000 I	.014 0.0 0.0000 I	.012 0.0 0.0000 I	.011 0.0 0.0000 I
.007 0.0 .0923 A	.021 0.0 .0732 A	.044 0.0 .0879 A	.117 0.0 .1153 A
.029 0.0 .0960 A	.030 0.0 .0747 A	.112 0.0 .1004 A	.199 2.5 .1329 S
.055 3.0 .1022 S	.037 0.0 .0758 A	.165 2.5 .1103 S	.298 3.0 .1545 M
.098 3.0 .1111 S	.057 0.0 .0789 A	.226 3.0 .1219 M	.446 6.0 .1875 F
.229 4.5 .1391 M	.117 0.0 .0886 R	.360 5.5 .1478 F	.560 7.0 .2134 F
.363 6.0 .1686 F	.179 0.0 .0987 R	.466 5.5 .1687 F	.619 6.5 .2270 F
.462 8.0 .1908 F	.226 4.0 .1065 F	.566 6.5 .1887 F	.682 7.5 .2415 F
.588 7.5 .2195 F	.360 4.0 .1292 F	.611 6.0 .1970 F	.712 7.0 .2485 F
.672 7.0 .2388 F	.471 4.0 .1404 F	.645 6.0 .2047 F	.734 6.5 .2536 F
.702 7.0 .2457 F	.553 4.0 .1627 F	.702 6.0 .2163 F	.769 6.0 .2617 F
.723 7.5 .2506 F	.620 6.5 .1759 F	.723 6.5 .2205 F	.782 6.5 .2648 F
.757 0.0 .2585 I	.654 0.0 .1805 I	.734 0.0 .2220 I	.794 0.0 .2676 I
.800 0.0 .2704 I	.702 0.0 .1891 I	.769 0.0 .2300 I	.800 0.0 .2709 I

APENDICE I

PROGRAMAS UTILIZADOS

```

1000 REM          ***** PROGRAMA ALTURA.BAS *****
2000 REM *** PROGRAMA PARA A DETERMINACAO DOS COEFICIENTES DA CORRELACAO PARA A PREDITAO DA ALTURA DA DISPERSAO ***
2010 REM *** O PROGRAMA UTILIZA O METODO DE GAUSS PARA A RESOLUCAO DA MATRIZ ***
2020 REM          ***** NOMENCLATURA *****
2030 REM *** A(B,N) = Elementos de 'a' ***
2040 REM *** FX(B) = Elementos de 'x' ***
2050 REM *** A(B,M) = Elementos de 'b' ***
2060 REM *** B = Numero de grupos dimensionais envolvidos ***
2070 REM *** N = Numero de colunas da matriz formada pelos grupos dimensionais ***
2080 INPUT "Qual o nome do arquivo a ser utilizado para a leitura ";NA1$
2090 ARQ1$="F:";NA1$
2100 INPUT "Qual o numero de grupos dimensionais ";B
2110 N=B*0.5
2120 N=INT(N)
2130 INPUT "Qual o numero de pontos experimentais utilizados ";NP
2140 DIM A(B,N+1), PI(B), FX(B)
2150 OPEN (UNIT=1,FILE=ARQ1$,ACCESS=1,MODE=A)
2170 FOR Z = 1 TO NP
2180 CLS
2190 PRINT :PRINT :PRINT "Z = ";Z
2200 READ (1,"F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,A2,F5.1") G1,G2,G3,G4,G5,G6,G7,D$,HH
2202 IF D$=" R" OR D$=" S" THEN GOTO 2430
2210 IF G1=0 THEN GOTO 2430
2220 PI(1)=LOG(G1)
2230 PI(2)=LOG(G2)
2240 PI(3)=LOG(G3)
2250 PI(4)=LOG(G4)
2260 PI(5)=LOG(G5)
2270 PI(6)=LOG(G6)
2280 PI(7)=LOG(G7)
2290 FOR J = 2 TO B
2300 FOR I = 2 TO B
2310 A(J,I)=A(J,I) + PI(J)*PI(I)
2320 NEXT I
2330 NEXT J
2340 FOR I = 2 TO B
2350 A(1,I) = A(1,I)+PI(I)
2360 A(1,1) = A(1,I)
2370 NEXT I
2380 A(1,1) = B
2390 A(1,B) = A(1,B) + PI(1)
2400 FOR I = 2 TO B
2410 A(1,B) = A(1,B) + PI(1)*PI(I)
2420 NEXT I
2430 NEXT Z
2440 CLOSE (1)
2450 GOSUB 2610
2460 OPEN (UNIT=1,FILE=ARQ1$,ACCESS=1,MODE=A)
2470 FOR Z=1 TO NP
2480 READ (1,"F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,A2,F5.1") G1,G2,G3,G4,G5,G6,G7,D$,HH
2490 A1=0
2494 IF D$=" R" OR D$=" S" THEN GOTO 2560
2496 IF G1=0 THEN GOTO 2560
2500 A1=FX(1)+FX(2)*LOG(G2)+FX(3)*LOG(G3)+FX(4)*LOG(G4)+FX(5)*LOG(G5)+FX(6)*LOG(G6)+FX(7)*LOG(G7)
2510 AA1=0
2520 AA1=(10*AA1)+0.21

```

```

2525 NNNN=NNNN+1
2530 ERRO=(G1*0.21-AA1)*100/(G1*0.21)
2540 ERMED=ERMED+ABS(ERRO)
2550 LPRINT "MH Exp. = ";G1*0.21, "MH Calc. = ";AA1, "ERRO = ";ERRO
2560 NEXT Z
2570 CLOSE (1)
2580 ERM=ERMED/NNNN
2590 REM *** IMPRESSÃO DOS COEFICIENTES DA CORRELAÇÃO ***
2600 FX(1)=10*FX(1)
2610 LPRINT :LPRINT :LPRINT
2620 FOR I=1 TO B
2630 LPRINT "FX('I:') = ";FX(I)
2640 NEXT I
2650 LPRINT "Erro medio = ";ERM
2660 LPRINT "Nº DE PONTOS EXPERIMENTAIS = ";NNNN
2670 STOP
2680 REM *** SUB ROTINA PARA A RESOLUÇÃO DE MATRIZES PELO MODO DE ELIMINAÇÃO DE GAUSS ***
2690 M=N+1.5
2700 N=INT(M)
2710 L=N-0.5
2720 L=INT(L)
2730 FOR K=1 TO L
2740 JJ=K
2750 BIG=ABS(A(K,K))
2760 KP1=K+1
2770 FOR I=KP1 TO N
2780 AB=ABS(A(I,K))
2790 IF (BIG-AB) >= 0 THEN GOTO 2750
2800 BIG=AB
2810 JJ=I
2820 NEXT I
2830 IF (JJ-K)=0 THEN GOTO 2820
2840 FOR J=K TO N
2850 TEMP=A(JJ,J)
2860 A(JJ,J)=A(K,J)
2870 A(K,J)=TEMP
2880 NEXT J
2890 FOR I=KP1 TO N
2900 QUOT=A(I,K)/A(K,K)
2910 FOR J=KP1 TO N
2920 A(I,J)=A(I,J)-QUOT*A(K,J)
2930 NEXT J
2940 NEXT I
2950 FOR I=KP1 TO N
2960 A(I,K)=0
2970 NEXT I
2980 NEXT K
2990 FX(N)=A(N,N)/A(N,N)
3000 FOR NN=1 TO L
3010 SUM=0
3020 I=N-NN
3030 IP1=I+1
3040 FOR J=IP1 TO N
3050 SUM=SUM+A(I,J)*FX(J)
3060 NEXT J
3070 FX(I)=(A(I,N)-SUM)/A(I,I)
3080 NEXT NN
3090 RETURN

```

```

300 REM          ***** PROGRAMA DADOS.BAS *****
400 REM *** PROGRAMA PARA O CALCULO DAS PROPRIEDADES FISICO-QUIMICAS DAS DISPERSES E DAS VAZES DAS FASES NOS PRATOS DA CO
LUNA, PARA OS EXPERIMENTOS COM REFLUXO TOTAL ***
500 INPUT "Qual o nome do arquivo a ser utilizado para a leitura ";NA1$
510 ARQ1$="F:"+NA1$
520 INPUT "Qual o nome do arquivo a ser utilizado para a gravacao ";NA2$
530 ARQ2$="F:"+NA2$
540 INPUT "Qual o numero de corridas reunidas no arquivo ";N
550 NRN= 14*N
560 DIM XA(14),H(14),HM(14),XW(14),TK(14),T(14),TRW(14),TRA(14),YA(14),YW(14),XPA(14),ROL(14),FF0(14),FF1(14),FF2(14),BWA(1
4),FF3(14),FF4(14),FF5(14),BAA(14),TBWA(14),FF2(14),FF7(14),FF8(14),BWA(14),VIRI(14),Z(14),VMS(14),RMV(14),ROD(14),TOW(14),
TSA(14)
570 DIM FIW(14),FIA(14),BETA(14),WV(14),B(14),FINT(14),FIAT(14),TSM(14),MIWA(14),DS(14),RMX(14),DA(14),L(14),V(14),EL(14),E
V(14),VV(14),LV(14),VS(14)
580 OPEN (UNIT=1,FILE=ARQ1$,ACCESS=1,MODE=A)
590 READ (1,"F6.2,F6.3,A7,F7.2,F5.1,F5.1,F7.4") AL,C1,P85,TVAP,CUST,PRES,DB
600 FOR I=0 TO 13
610 READ (1,"F6.3,F4.1,F5.1,A2") XA(I),H(I),HM(I),DS(I)
620 NEXT I
630 NRN = NRN+1
640 GOTO 750
650 OPEN (UNIT=2,FILE=ARQ2$,ACCESS=0,MODE=A)
660 WRITE (2,"F6.2,F6.3,A7,F7.2,F5.1,F5.1,F7.4") AL,C1,P85,TVAP,DBST,PRES,DB
670 FOR I = 0 TO 13
680 WRITE (2,"F6.3,F6.3,F4.1,F5.1,F8.3,F8.2,F7.4,F9.4,F8.5,F8.5,F10.7,F7.4,F8.4,F8.3,A2") XA(I),YA(I),H(I),HM(I),T(I),WV(I)
,LV(I),VS(I),L(I),V(I),ROD(I),ROL(I),TSM(I),MIWA(I),DS(I)
690 NEXT I
700 IF ABS(NRN-N)<0.2 THEN GOTO 720
710 GOTO 590
720 CLOSE (1)
730 CLOSE (2)
740 STOP
750 PCW=217.6:PCA=63
760 TCW=647.3:TCA=516.2
770 WNW=0.348:WNA=0.635
780 UNW=10:UNA=58.3
790 VCN=56:VCA=167
800 MW=18:MA=46
810 XXW=0.023:XXA=0
820 AREA=21.5924
830 FOR I= 0 TO 13
835 PRINT "NRN = ";NRN,"I = ";I
840 XW(I)=1-XA(I)
850 RMX(I)=XA(I)*MA+XW(I)*MW
860 GOSUB 11000
870 TK(I)=T(I)+273.15
880 TRW(I)=TK(I)/TCW:TRA(I)=TK(I)/TCA
900 GOSUB 12000
910 GOSUB 13000
920 GOSUB 14000
930 GOSUB 15000
940 GOSUB 16000
960 NEXT I
970 GOSUB 17000

```

```

980 IF ABS(1-MNM))0.5 THEN GOTO 660
990 GOTO 650
11000 REM *** SUB ROTINA PARA O CALCULO DA TEMPERATURA DA MISTURA EM FUNCAO DA COMPOSICAO EM ETANOL ***
11010 REM *** CORRELACOES OBTIDAS A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS CONTIDOS EM: GMEHLING, J.; DNKEN, U.; "Vapour-Liquid Equilibrium Data Collection", Dechema Chemistry Data Series, V. 1, part 1, (1977). ***
11020 IF XA(1)=0 AND XA(1)<0.040 THEN GOTO 11050
11030 IF XA(1)=0.040 AND XA(1)<0.155 THEN GOTO 11070
11040 IF XA(1)=0.155 AND XA(1)<0.89 THEN GOTO 11070
11050 T(1)=99.9893-126.245*XA(1)-6833.83*XA(1)*XA(1)+112678*(XA(1)**3)
11060 GOTO 11100
11070 T(1)=96.6233-172.591*XA(1)+851.531*XA(1)*XA(1)-1673.79*(XA(1)**3)
11080 GOTO 11100
11090 T(1)=87.1536-26.2232*XA(1)+38.398*XA(1)*XA(1)-13.9041*(XA(1)**3)
11100 RETURN
12000 REM *** SUB ROTINA PARA O CALCULO DA COMPOSICAO DA FASE VAPOR EM FUNCAO DA COMPOSICAO DA FASE LIQUIDA ***
12010 REM *** CORRELACOES OBTIDAS DOS DADOS EXPERIMENTAIS RELACIONADOS EM: GMEHLING, J.; DNKEN, U.; "Vapour-Liquid Equilibrium Data Collection", Dechema Chemistry Data Series, Vol. 1, part 1, (1977). ***
12020 IF XA(1)=0 THEN YA(1)=0
12030 IF XA(1)=0 AND XA(1)<0.040 THEN GOTO 12070
12050 IF XA(1)=0.040 AND XA(1)<0.155 THEN GOTO 12070
12060 IF XA(1)=0.155 AND XA(1)<0.890 THEN GOTO 12110
12070 YA(1) = -0.004887+13.3144*XA(1)-320.366*XA(1)*XA(1)+7523.97*(XA(1)**3)-88622.5*(XA(1)**4)
12080 GOTO 12130
12090 YA(1) = 0.14397+4.38826*XA(1)-16.5643*XA(1)*XA(1)+19.8641*(XA(1)**3)
12100 GOTO 12130
12110 YA(1) = 0.389426+0.963617*XA(1)-1.75672*XA(1)*XA(1)+2.18234*(XA(1)**3)-0.717424*(XA(1)**4)
12130 YW(1)=1-YA(1)
12140 RETURN
13000 REM *** SUB ROTINA PARA CALCULO DA DENSIDADE DA FASE LIQUIDA DA MISTURA ETANOL-AGUA ***
13010 IF XA(1)=0 THEN GOTO 13040
13020 XPA(1)=1/(1+((1-XA(1))/XA(1))*NMW/MA)
13030 DA(1)=1.0251-0.00066*T(1)
13040 RDL(1)=XPA(1)*0.7365+((1-XPA(1))*DA(1))
13050 RETURN
14000 REM *** SUB ROTINA PARA O CALCULO DA DENSIDADE DA FASE GASOSA DA MISTURA ETANOL-AGUA ***
14010 KWA=0.1; KA=0.0878; BA=0.0572; AW=0.0279; BW=0.0229
14020 FF0(1)=0.1445-0.33/TRW(1)-0.1385/(TRW(1)*TRW(1))-0.0121/(TRW(1)**3)-0.000607/(TRW(1)**8)
14030 FF1(1)=0.0637+0.331/(TRW(1)*TRW(1))-0.423/(TRW(1)**3)-0.008/(TRW(1)**8)
14040 FF2(1)=AW/(TRW(1)**6)-BW/(TRW(1)**8)
14050 BWW(1)=82.05*TCW/PCW*(FF0(1)+WWW*FF1(1)+FF2(1))
14060 FF3(1)=0.1445-0.33/TRA(1)-0.1385/(TRA(1)*TRA(1))-0.0121/(TRA(1)**3)-0.000607/(TRA(1)**8)
14070 FF4(1)=0.0637+0.331/(TRA(1)*TRA(1))-0.423/(TRA(1)**3)-0.008/(TRA(1)**8)
14080 FF5(1)=AA/(TRA(1)**6)-BA/(TRA(1)**8)
14090 BAA(1)=82.05*TCA/PCA*(FF3(1)+WWA*FF4(1)+FF5(1))
14100 TCWA=(TCW*TCA)**0.5*(1-KWA)
14110 TRWA(1)=TK(1)/TCWA
14120 PCWA=4*TCWA*(PCW*VCW/TCW+PCA*VCA/TCA)/((VCW**((1/3)+VCA**((1/3))**3)
14130 WWA=0.5*(WWW+WWA)
14140 AAW=0.5*(AA+AW)
14150 BAW=0.5*(BA+BW)
14160 FF6(1)=0.1445-0.33/TRWA(1)-0.1385/(TRWA(1)*TRWA(1))-0.0121/(TRWA(1)**3)-0.000607/(TRWA(1)**8)
14170 FF7(1)=0.0637+0.331/(TRWA(1)*TRWA(1))-0.423/(TRWA(1)**3)-0.008/(TRWA(1)**8)
14180 FF8(1)=AAW/(TRWA(1)**6)-BAW/(TRWA(1)**8)
14190 BWA(1)=82.05*TCWA/PCWA*(FF6(1)+WWA*FF7(1)+FF8(1))
14200 VIRI(1)=2*BWA(1)-BBW(1)-BAA(1)
14210 Z(1)=1+BWA(1)*1/82.05/TK(1)
14220 VNG(1)=Z(1)*82.05*TK(1)/1
14230 HMY(1)=YA(1)*MA+YW(1)*MW
14240 ROB(1)=HMY(1)/VNG(1)

```

14340 RETURN

15000 REM *** PROGRAMA PARA O CALCULO DA TENSÃO SUPERFICIAL DA MISTURA ETANOL - AGUA ***

15010 REM *** Ref.: THE PROPERTIES OF GASES AND LIQUIDS; Reid, Prausnitz e Sherwood, 3ª ed., p. 622 e 623, e tambem p. 608 . ***

15090 QPW=0.1574+0.359*WUA-1.769*XXU-13.69*XXU*YYU-0.51*WUU*WUU+1.298*WUU*XXU

15100 QPA=0.1574+0.359*WUA-1.769*XXA-13.69*XXA*YYA-0.51*WUA*WUA+1.298*WUA*XXA

15110 MMW=1.21+0.5385*WUU-14.61*XXU-32.07*XXU*XXU-1.656*WUU*WUU+22.03*WUU*XXU

15120 MMA=1.21+0.5385*WUA-14.61*XXA-32.07*XXA*XXA-1.656*WUA*WUA+22.03*WUA*XXA

15130 TSW(I)=(PCW**(2/3))*(TCW**(1/3))*QPW*((1-TW(I))/0.4)**MMW

15140 TSA(I)=(PCA**(2/3))*(TCA**(1/3))*QPA*((1-TRA(I))/0.4)**MMA

15144 IF XA(I)=0 THEN GOTO 15275

15150 REM *** TENSÃO SUPERFICIAL DE MISTURAS - Correlacao de Tawara, Kurata e Otsani ***

15160 Q=2

15170 FIW(I)= XW(I)*VWU/(XW(I)*VWU+XA(I)*VUA)

15180 FIA(I)= XA(I)*VUA/(XW(I)*VWU+XA(I)*VUA)

15190 BETA(I)=LOG(FIW(I))*Q/FIA(I))

15200 WV(I)=0.441*Q/TK(I)*(TSA(I)*(VUA**(2/3))/Q-TSW(I)*(VWU**(2/3)))

15210 B(I)=10**(BETA(I)+WV(I))

15220 FIWT(I)=(1-B(I))-(B(I)*B(I)+4*B(I))**(1/2))/2

15230 IF FIWT(I)=0 AND FIWT(I)=1 THEN GOTO 15250

15240 FIWT(I)=(1-B(I)+(B(I)*B(I)+4*B(I))**(1/2))/2

15250 FIAT(I)=1-FIWT(I)

15260 TSM(I)=(FIWT(I)*TSW(I)**0.25+FIAT(I)*TSA(I)**0.25)**4 : GOTO 15280

15275 TSM(I)=60.7431

15280 RETURN

16000 REM *** PROGRAMA PARA O CALCULO DA VISCOSIDADE DA MISTURA ETANOL-AGUA ***

16010 REM *** CORRELACOES OBTIDAS DE EXTRAPOLACOES DE DADOS CONTIDOS EM: 1.-) VARSHNIK, M. B.; "Tables on the Thermodynamic Properties of Liquids and Gases - in Normal and Dissociated States", 2ª ed., Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1975. ***

16030 REM *** 2.-) MISRA, B. N.; VARSHNI, Y. P.; "Viscosity-Temperature Relation for Solutions", Journal of Chemical and Engineering Data, V. 6, nº 2, April 1961 ***

16040 MWUA(I) = 0.281164+2.9823*XA(I)-9.13532*XA(I)*XA(I)+11.286*(XA(I)**3)-4.57668*(XA(I)**4)-0.353117*(XA(I)**5)

16060 RETURN

17000 REM *** SUB ROTINA PARA O CALCULO DAS VAZÕES MOLARES DO LÍQUIDO E DO VAPOR , VAZÕES VOLUMÉTRICAS DO LÍQUIDO E DO VAPOR E TAMBEEM DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO VAPOR EM CADA PRATO ***

17010 REM *** AS CORRELACOES PARA O CALCULO DAS ENTALPIAS DO LÍQUIDO E DO VAPOR FORAM OBTIDAS A PARTIR DOS DADOS APRESENTADOS EM: BROWN, G. G.; "Operaciones Basicas de la Ingenieria Quimica", Editorial Marin SA, Barcelona, (1965). ***

17020 L(13) = (TVAP/60)*ROL(13)*(1/MMX(13))

17030 FOR I = 13 TO 2 STEP -1

17040 I=I+0.1:I=INT(I)

17050 D=I-0.9:D=INT(D)

17060 S=I-1.9:S=INT(S)

17070 YA(D)=XA(I)

17080 YA(S)=XA(D)

17090 EL(I)=1799.82-3030.76*XA(I)+18933*(XA(I)**2)-40331.50*(XA(I)**3)+38472.70*(XA(I)**4)-13567*(XA(I)**5)

17100 EL(D)=1799.82-3030.76*XA(D)+18933*(XA(D)**2)-40331.50*(XA(D)**3)+38472.70*(XA(D)**4)-13567*(XA(D)**5)

17110 EV(D)=11505.80+579.934*YA(D)-2989.25*(YA(D)**2)+7853.80*(YA(D)**3)-8674.88*(YA(D)**4)+3425.39*(YA(D)**5)

17120 EV(S)=11505.80+579.934*YA(S)-2989.25*(YA(S)**2)+7853.80*(YA(S)**3)-8674.88*(YA(S)**4)+3425.39*(YA(S)**5)

17130 V(D)=L(I)

17140 L(D)=(EL(I)-EV(D))/(EL(D)-EV(S))*L(I)

17150 VS(D)=L(D)

17160 NEXT I

17210 FOR I= 0 TO 13

17220 WV(I)=VWG(I)*V(I)

17230 LV(I)=MMX(I)/ROL(I)*L(I)

17240 VS(I)=WV(I)/AREA

17260 NEXT I

17270 RETURN

```

10 REM ***** PROGRAMA GRUPOS.BAS *****
20 REM *** PROGRAMA PARA O CALCULO DOS GRUPOS DIMENSIONAIS ***
30 INPUT "Qual o nome do arquivo a ser utilizado para a leitura ";NA15
40 ARQ15="E:" + NA15
50 INPUT "Qual o nome do arquivo a ser utilizado para a gravacao ";NA25
60 ARQ25="F:" + NA25
70 INPUT "Qual o numero de corridas reunidas no arquivo ";N
80 N=11*N
90 DIM XA(14),H(14),HH(14),XW(14),TK(14),T(14),YA(14),YW(14),ROS(14)
100 DIM G1(K),G2(K),G3(K),G4(K),G5(K),G6(K),G7(K)
110 DIM TEA(14),TEW(14),ONPA(14),OPA(14),MIGA(14),MIGW(14),FI12(14),FI21(14),MING(14),ONPW(14),OPW(14)
120 DIM TSK(14),MIWA(14),DS(14),L(14),V(14),VV(14),LV(14),VS(14),ROL(14)
130 OPEN (UNIT=1,FILE=ARQ15,ACCESS=I,MODE=A)
140 READ (1,"F6.2,F6.2,A7,F7.2,F5.1,F5.1,F7.4") AL,CI,RRE,TVAP,BEST,PRES,DD
150 FOR I=0 TO 13
160 READ (1,"F6.3,F6.3,F4.1,F5.1,F8.3,F8.2,F7.4,F9.4,F8.5,F8.5,F10.7,F7.4,F8.4,F8.5,A2") XA(I),YA(I),H(I),HH(I),T(I),VV(I),
LV(I),VS(I),L(I),V(I),ROS(I),ROL(I),TSK(I),MIWA(I),DS(I)
170 TK(I)=T(I)+273.15
180 NEXT I
190 NNN = NNN+1
200 GOTO 370
210 OPEN (UNIT=2,FILE=ARQ25,ACCESS=O,MODE=A)
220 FOR I = 1 TO 11
230 IF XA(I)=0.000 THEN GOTO 260
240 NNNN=NNNN+1
250 WRITE (2,"F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,F10.6,A2,F5.1") G1(I),G2(I),G3(I),G4(I),G5(I),G6(I),G7(I),DS(I),HH(I)
260 NEXT I
270 IF ABS(NNN-N)=0.2 THEN GOTO 330
280 AAA=AAA+1
290 CLS
300 PRINT
310 PRINT "AAA = ";AAA
320 GOTO 140
330 CLOSE (1)
340 CLOSE (2)
350 PRINT "NNNN = ";NNNN
360 STOP
370 REM *** CALCULO DA VISCOSIDADE DOS GASES PARA OS COMPOSTOS Puros ***
380 SW=2.52
390 EXW=775
400 LW=1.0
410 SA=4.31
420 EXA=431
430 LA=0.3
440 FOR I= 0 TO 13
450 TEA(I)=TK(I)/EKA
460 TEW(I)=TK(I)/EXW
470 ONPA(I)=1.16145/(TEA(I)**0.14874) + 0.52487/EXP(0.77320*TEA(I)) + 2.16178/EXP(2.43787*TEA(I))
480 OPA(I)= ONPA(I) + 0.2*LA*LA/TEA(I)
490 MIGA(I)=26.69*((46.07*TK(I))**0.5)/(SA*SA*OPA(I))
500 ONPW(I)=1.16145/(TEW(I)**0.14874) + 0.52487/EXP(0.77320*TEW(I)) + 2.16178/EXP(2.43787*TEW(I))
510 OPW(I)=ONPW(I) + 0.2*LW*LW/TEW(I)
520 MIGW(I)=26.69*((18*TK(I))**0.5)/(SW*SW*OPW(I))
530 REM *** CALCULO DA VISCOSIDADE DA MISTURA GASOSA ***
540 FI12(I)=(1+((MIGA(I)/MIGW(I))**0.5)*((18/46.07)**0.25))**2/((8*(1+(46.07/18))**0.5)
550 FI21(I)=FI12(I)*(MIGW(I)/MIGA(I))*(46.07/18)
560 MING(I)=YA(I)*MIGA(I)/(YA(I)+(1-YA(I))*FI12(I)) + (1-YA(I))*MIGW(I)/((1-YA(I))+YA(I)*FI21(I))
570 MING(I)=MING(I)*(10**(-6))
580 NEXT I

```

```

590 REM *** CALCULO DOS GRUPOS ADIMENSIONAIS ***
600 FOR I=1 TO 11
610 IF XA(I)=0.000 THEN GOTO 690
620 B1(I)=HH(I)/0.21
630 B2(I)=900*DO/VS(I)/VS(I)
640 B3(I)=L(I)/V(I)
650 B4(I)=VS(I)*DO*ROG(I)/MINS(I)
660 B5(I)=(LV(I)/21.5984)*DO*ROG(I)/(MWA(I)*0.01)
670 B6(I)=TSM(I)/(MWA(I)*0.01)/VS(I)
680 B7(I)=AL*0.01
690 NEXT I
700 IF ABS(1-RHH) > 0.5 THEN GOTO 220
710 GOTO 210

```

```

1000 REM          ***** PROGRAMA RETENCAO.BAS *****
2000 REM *** PROGRAMA PARA A DETERMINACAO DOS COEFICIENTES DA CORRELACAO PARA A PREVISAO DO PONTO DE RETENCAO ***
2010 REM *** O PROGRAMA UTILIZA O METODO DE GAUSS PARA A RESOLUCAO DA MATRIZ ***
2020 REM          ***** NOMENCLATURA *****
2030 REM *** A(B,N) = Elementos de "a" ***
2040 REM *** FX(B) = Elementos de "x" ***
2050 REM *** A(B,N) = Elementos de "b" ***
2060 REM *** B = Numero de grupos dimensionais envolvidos ***
2070 REM *** N = Numero de colunas da matriz formada pelos grupos dimensionais ***
2080 INPUT "Qual o nome do arquivo a ser utilizado para a leitura ";NAIS$
2090 ADRIS="F:"+NAIS$
2100 INPUT "Qual o numero de grupos dimensionais ";B
2110 N=B+0.5
2120 N=INT(N)
2130 INPUT "Qual o numero de pontos experimentais utilizados ";NP
2140 DIM A(B,N+1), PI(B), FX(B)
2160 OPEN (UNIT=1,FILE=ADRIS,ACCESS=1,MODE=A)
2170 FOR Z = 1 TO NP
2180 CLS
2190 PRINT :PRINT :PRINT "Z = ";Z
2200 READ (1,"F10.6,F10.6,F10.6,F13.6,F10.6,F13.6,F10.6,A2,F5.1") G7,G2,G3,G4,G1,G5,G6,D$,HH
2202 IF D$ = " R" OR D$ = " S" THEN GOTO 2204
2203 GOTO 2430
2204 IF G6<0.23 AND HH>1.0 THEN GOTO 2430
2206 IF G6>0.23 AND G6<0.34 AND HH>1.5 THEN GOTO 2430
2208 IF G6>0.34 AND HH>2.5 THEN GOTO 2430
2210 IF G1=0 THEN GOTO 2230
2220 PI(1)=LOG(G1)
2230 PI(2)=LOG(G2)
2240 PI(3)=LOG(G3)
2250 PI(4)=LOG(G4)
2260 PI(5)=LOG(G5)
2270 PI(6)=LOG(G6)
2290 FOR J = 2 TO B
2300 FOR I = 2 TO B
2310 A(J,I)=A(J,I) + PI(J)*PI(I)
2320 NEXT I
2330 NEXT J
2340 FOR I = 2 TO B
2350 A(1,I) = A(1,I)+PI(1)
2360 A(1,1) = A(1,1)
2370 NEXT I
2380 A(1,1) = B
2390 A(1,7) = A(1,7) + PI(1)
2400 FOR I = 2 TO B
2410 A(1,7) = A(1,7) + PI(1)*PI(1)
2420 NEXT I
2430 NEXT Z
2440 CLOSE (1)
2450 GOSUB 2610
2460 OPEN (UNIT=1,FILE=ADRIS,ACCESS=1,MODE=A)
2470 FOR Z=1 TO NP
2480 READ (1,"F10.6,F10.6,F10.6,F13.6,F10.6,F13.6,F10.6,A2,F5.1") G7,G2,G3,G4,G1,G5,G6,D$,HH
2490 A1=0
2492 IF D$ = " R" OR D$ = " S" THEN GOTO 2494
2493 GOTO 2560
2494 IF G6<0.23 AND HH>1.0 THEN 2560
2496 IF G6>0.23 AND G6<0.34 AND HH>1.5 THEN 2560
2498 IF G6>0.34 AND HH>2.5 THEN 2560

```

```

2500 A1=FX(1)+FX(2)*LOG(G2)+FX(3)*LOG(G3)+FX(4)*LOG(G4)+FX(5)*LOG(G5)+FX(6)*LOG(G6)
2510 AA1=0
2520 AA1=10**A1
2525 NP1=NP1+1
2530 ERRO=(G1-AA1)*100/G1
2540 ERMED=ERMED+ABS(ERRO)
2550 PRINT "Re liq. Exp. = ";G1, "Re liq. Calc. = ";AA1
2560 NEXT Z
2570 CLOSE (1)
2580 ERM=ERMED/NP1
2581 REM *** IMPRESSAO DOS COEFICIENTES DA CORRELACAO ***
2582 FX(1)=10**FX(1)
2584 FOR I=1 TO B
2586 LPRINT "FX('I;') = ";FX(I)
2588 NEXT I
2590 LPRINT "Erro medio = ";ERM
2600 STOP
2610 REM *** SUB ROTINA PARA A RESOLU O DE MATRIZES PELO MTODO DE ELIMINACAO DE GAUSS ***
2620 M=M+1.5
2630 N=INT(M)
2640 L=N-0.5
2650 L=INT(L)
2660 FOR K=1 TO L
2670 JJ=K
2680 B16=ABS(A(K,K))
2690 KP1=K+1
2700 FOR I=KP1 TO N
2710 A8=ABS(A(I,K))
2720 IF (B16-A8) >= 0 THEN GOTO 2750
2730 B16=A8
2740 JJ=I
2750 NEXT I
2760 IF (JJ-K)=0 THEN GOTO 2820
2770 FOR J=K TO N
2780 TEMP=A(JJ,J)
2790 A(JJ,J)=A(K,J)
2800 A(K,J)=TEMP
2810 NEXT J
2820 FOR I=KP1 TO N
2830 QUOT=A(I,K)/A(K,K)
2840 FOR J=KP1 TO N
2850 A(I,J)=A(I,J)-QUOT*A(K,J)
2860 NEXT J
2870 NEXT I
2880 FOR I=KP1 TO N
2890 A(I,K)=0
2900 NEXT I
2910 NEXT K
2920 FX(N)=A(N,M)/A(N,N)
2930 FOR NN=1 TO L
2940 SUM=0
2950 I=N-NN
2960 IP1=I+1
2970 FOR J=IP1 TO N
2980 SUM=SUM+A(I,J)*FX(J)
2990 NEXT J
3000 FX(I)=(A(I,M)-SUM)/A(I,I)
3010 NEXT NN
3020 RETURN

```

```

1000 REM          ***** TRANSICAO.BAS *****
2000 REM *** PROGRAMA PARA A DETERMINACAO DOS COEFICIENTES DA CORRELACAO PARA A PREVISAO DA TRANSICAO FROTH-SPRAY ***
2010 REM *** O PROGRAMA UTILIZA O METODO DE GAUSS PARA A RESOLUCAO DA MATRIZ ***
2020 REM          ***** NOMENCLATURA *****
2030 REM *** A(B,N) = Elementos de 'a' ***
2040 REM *** FX(B) = Elementos de 'x' ***
2050 REM *** A(B,N) = Elementos de 'b' ***
2060 REM *** B = Numero de grupos dimensionais envolvidos ***
2070 REM *** N = Numero de colunas da matriz formada pelos grupos dimensionais ***
2080 INPUT "Qual o nome do arquivo a ser utilizado para a leitura ";NAIS
2090 ARQIS="F:"+NAIS
2100 INPUT "Qual o numero de grupos dimensionais ";B
2110 N=B+0.5
2120 N=INT(N)
2130 INPUT "Qual o numero de pontos experimentais utilizados ";NP
2140 DIM A(B,N+1), PI(B), FX(B)
2160 OPEN (UNIT=1,FILE=ARQIS,ACCESS=I,MODE=A)
2170 FOR Z = 1 TO NP
2180 CLS
2190 PRINT :PRINT :PRINT "Z = ";Z
2200 READ (1,"F10.6,F10.6,F10.6,F13.6,F10.6,F13.6,F10.6,A2,F5.1") G1,G2,G3,G4,G5,G6,G7,D$,HH
2202 IF D$(1) " N" THEN GOTO 2430
2210 IF G1=0 THEN GOTO 2230
2220 PI(1)=LOG(G1)
2230 PI(2)=LOG(G2)
2240 PI(3)=LOG(G3)
2250 PI(4)=LOG(G4)
2260 PI(5)=LOG(G5)
2270 PI(6)=LOG(G6)
2280 PI(7)=LOG(G7)
2290 FOR J = 2 TO B
2300 FOR I = 2 TO B
2310 A(I,J)=A(I,J) + PI(J)*PI(I)
2320 NEXT I
2330 NEXT J
2340 FOR I = 2 TO B
2350 A(I,J) = A(I,J)+PI(J)
2360 A(I,1) = A(I,1)
2370 NEXT I
2380 A(1,1) = B
2390 A(1,B) = A(1,B) + PI(1)
2400 FOR I = 2 TO B
2410 A(I,B) = A(I,B) + PI(1)*PI(I)
2420 NEXT I
2430 NEXT Z
2440 CLOSE (1)
2450 GOSUB 2610
2460 OPEN (UNIT=1,FILE=ARQIS,ACCESS=I,MODE=A)
2470 FOR Z=1 TO NP
2480 READ (1,"F10.6,F10.6,F10.6,F13.6,F10.6,F13.6,F10.6,A2,F5.1") G1,G2,G3,G4,G5,G6,G7,D$,HH
2490 A1=0
2495 IF D$(1) " N" THEN GOTO 2560
2500 A1=FX(1)+FX(2)*LOG(G2)+FX(3)*LOG(G3)+FX(4)*LOG(G4)+FX(5)*LOG(G5)+FX(6)*LOG(G6)+FX(7)*LOG(G7)
2510 AA1=0
2520 AA1=10**A1*0.21
2525 NP1=NP1+1
2530 ERRO=(G1*0.21-AA1)*100/(G1*0.21)
2540 ERMED=ERMED+ABS(ERRO)
2550 LPRINT "HH Exp. = ";G1*0.21 , "HH Calc. = ";AA1, "ERRO = ";ERRO

```

```

2560 NEXT Z
2570 CLOSE (1)
2580 ERN=ERNED/NP1
2590 REM *** IMPRESSAO DOS COEFICIENTES DA CORRELACAO ***
2592 FX(1)=10**FX(1)
2594 FOR I=1 TO B
2596 LPRINT "FX(";I;") = ";FX(I)
2598 NEXT I
2599 LPRINT "Erro medio = ";ERM
2600 STOP
2610 REM *** SUB ROTINA PARA A RESOLU O DE MATRIZES PELO MODO DE ELIMINACAO DE GAUSS ***
2620 M=N+1.5
2630 M=INT(M)
2640 L=M-0.5
2650 L=INT(L)
2660 FOR K=1 TO L
2670 JJ=K
2680 BIG=ABS(A(K,K))
2690 KP1=K+1
2700 FOR I=KP1 TO M
2710 AB=ABS(A(I,K))
2720 IF (BIG-AB) >= 0 THEN GOTO 2750
2730 BIG=AB
2740 JJ=I
2750 NEXT I
2760 IF (JJ-K)=0 THEN GOTO 2820
2770 FOR J=K TO M
2780 TEMP=A(JJ,J)
2790 A(JJ,J)=A(K,J)
2800 A(K,J)=TEMP
2810 NEXT J
2820 FOR I=KP1 TO M
2830 QUOT=A(I,K)/A(K,K)
2840 FOR J=KP1 TO M
2850 A(I,J)=A(I,J)-QUOT*A(K,J)
2860 NEXT J
2870 NEXT I
2880 FOR I=KP1 TO M
2890 A(I,K)=0
2900 NEXT I
2910 NEXT K
2920 FX(N)=A(N,M)/A(N,N)
2930 FOR NN=1 TO L
2940 SUM=0
2950 I=N-NN
2960 IP1=I+1
2970 FOR J=IP1 TO M
2980 SUM=SUM+A(I,J)*FX(J)
2990 NEXT J
3000 FX(I)=(A(I,M)-SUM)/A(I,I)
3010 NEXT NN
3020 RETURN

```

NOMENCLATURA

$\tilde{\alpha}$ = densidade da dispersão (h/H)

B = índice do comportamento hidrodinâmico em um prato sem ver-
tedor

Bo = n° adimensional de Bond [$(\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot d^2 / \sigma_l$]

B_s = n° adimensional para prever o início das oscilações

CV = composição volumétrica em etanol (%)

d = diâmetro do orifício (cm)

d_e = diâmetro equivalente dos orifícios (cm)

D = vazão molar do destilado (moles/s)

D_c = diâmetro da coluna (cm)

FD = fator de diluição

Fr = n° adimensional de Froude [$v_{go}^2 / (g \cdot H)$]

Fr* = n° adimensional de Froude modificado. [definido pela
equação (2.6)]

Fr* = n° adimensional de Froude modificado

$$(\rho_g \cdot v_{go}^2 / [(\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot d])^{0.5}$$

g = aceleração da gravidade (cm/s²)

G_g = vazão mássica do gás (g/s)

h = altura de líquido (cm)

h_t = altura de líquido na transição "froth-spray" (cm)

H = altura da dispersão (cm)

ΔH_{vap} = entalpia de vaporização (cal/mol)

IR = índice de refração da mistura etanol-água

k_2 = coeficiente adimensional

k_d = coeficiente de resistência devido ao gás

k_w = coeficiente de resistência devido ao líquido

L = vazão molar do líquido (moles/s)

L^* = vazão do líquido por unidade de área ($g/cm^2.s$)

L_0 = vazão mássica do líquido (g/s)

M = espaço livre entre o topo da dispersão em um prato e o prato imediatamente superior (cm)

Q_g = vazão volumétrica do gás (cm^3/s)

Q_l = vazão volumétrica do líquido (cm^3/s)

R = espaçamento entre os pratos (cm)

Re_l = número de Reynolds do líquido nos orifícios

T = espessura do prato (cm)

T_c = temperatura ($^{\circ}C$)

T_k = temperatura (K)

v_g = velocidade superficial do vapor (cm/s)

v_{go} = velocidade do vapor no orifício (cm/s)

v_l = velocidade superficial do líquido (cm/s)

v_{lo} = velocidade do líquido no orifício (cm/s)

V = vazão molar do vapor (moles/s)

x = fração molar do componente de menor tensão superficial

x_a = fração molar do etanol

x_p = fração em peso do etanol

x_v = fração volumétrica do etanol

Z_t = retenção de líquido na transição "froth-spray" por unidade de área

ϵ = porosidade da dispersão

ρ_{ar} = massa específica do ar (g/cm^3)

ρ_g = massa específica do vapor (g/cm^3)

ρ_l = massa específica do líquido (g/cm³)

$\mu_{\text{água}}$ = viscosidade dinâmica da água (g/cm.s)

μ_g = viscosidade dinâmica do vapor (g/cm.s)

μ_l = viscosidade dinâmica do líquido (g/cm.s)

$\sigma_{\text{água}}$ = tensão superficial da água (dina/cm)

σ_l = tensão superficial do líquido (dina/cm)

ν_t = viscosidade cinemática turbilhonar (cm²/s)

Φ = área livre de escoamento dos pratos

χ = fração da área total dos orifícios que está sendo ocupada pelo líquido

ξ = fator de atrito do prato seco