

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DE
PROCESSOS QUÍMICOS**

**TÍTULO DA TESE: ESTUDO E DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL
DA RETENÇÃO DE LÍQUIDO EM COLUNAS EMPACOTADAS
COM O RECHEIO ESTRUTURADO MELLAPAK 500Y**

AUTOR(A): RENATA TORRES PEREIRA PINTO

ORIENTADOR: PROFESSORA DOUTORA MARIA REGINA WOLF MACIEL

CO-ORIENTADOR: PROFESSOR DOUTOR ANTÔNIO J. A. MEIRELLES

**Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia
Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Química.**

Mai de 1998



UNIDADE	BC		
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP		
	P. 058e		
V.	Ex.		
TCMBO BC/	35.132		
PROC.	395.98		
C	<input type="checkbox"/>	D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00		
DATA	17/09/98		
N.º CPD			

CM-00116010-7

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P658e

Pinto, Renata Torres Pereira

Estudo e determinação experimental da retenção de líquido em colunas empacotadas com recheio estruturado mellapak 500y . / Renata Torres Periera Pinto.-- Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientadores: Maria Regina Wolf Maciel, Antônio J. ^a Meirelles.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Hidrodinâmica. 2. Viscosidade. 3. Absorção. 4. Materiais porosos. I. Maciel, Maria Regina Wolf. II. Meirelles, Antônio J. A. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 15 de maio de 1998 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:



Prof.^a Dr.^a Maria Regina Wolf Maciel
Orientadora



Prof. Dr. Fernando Antônio Cabral



Prof.^a Dr.^a Sandra Lúcia da Cruz

Esta versão corresponde a redação final da Dissertação de Mestrado ou tese de Doutorado em Engenharia Química defendida pelo(a) Eng.(a) e aprovada pela Comissão Julgadora em dia/mês/ano.



Prof.^ª Dr.^ª Maria Regina Wolf Maciel
Orientadora

TERCEIRA PÁGINA

AGRADECIMENTOS

À meu pai, minha mãe e meus irmãos pelo amor, apoio e carinho que me dedicaram durante a realização desta dissertação.

Ao Jair, com todo o meu amor, pelo apoio e amor a mim dedicado durante a realização deste trabalho.

A Prof^ª Dr^ª Maria Regina e ao Prof^º Dr^º Antônio José pelo tempo, apoio e dedicação demonstrada na orientação desta tese de mestrado.

Ao Prof^º. Dr^º. Fernando e Prof^ª. Dr^ª. Sandra na avaliação deste trabalho.

Ao Sr^º Lucimar Menezes, por nos tornar possível o contato entre a FEQ/FEA/UNICAMP, com a Sulzer Brasil.

A Sulzer Brasil pela doação do recheio estruturado Mellapak 500Y.

À CAPES pelo suporte financeiro.

Ao aluno de pós-graduação Antônio Carlos da Silva Ramos (FEQ/IQ/Físico-Química-I114/UNICAMP) e ao Prof^º Dr^º Watson Loh (IQ/Físico-Química-I114/UNICAMP) pela realização das medidas da tensão superficial das soluções utilizadas.

Ao Prof^º Dr^º Martin Aznar (DPQ/FEQ) pela verificação termodinâmica de alguns dos sistemas estudados e ao aluno de pós-graduação Luiz Fernando de Lima Luz Júnior (DPQ/FEQ) pela predição de dados físico-químicos de alguns sistemas, utilizando-se o simulador comercial ASPEN PLUS.

À todos os colegas e amigos pelo apoio nas horas difíceis e pela companhia nos momentos de lazer.

À todos os funcionários, técnicos e administrativos, da Faculdade de Engenharia Química e de Alimentos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Colunas empacotadas vêm sendo amplamente utilizadas em processos de separação industriais. A importância de se estudar os principais parâmetros deste processo está no fato de se estabelecer métodos razoáveis e confiáveis para o projeto de colunas contendo recheios estruturados. A retenção de líquido em colunas empacotadas é uma das principais características para que se possa obter uma correta predição dos parâmetros chaves de projeto.

O início deste trabalho teve como tarefa a aquisição do recheio comercial estruturado Mellapak 500Y (Sulzer Brasil). Posteriormente, foram realizados o projeto e a instalação da coluna e daí as adaptações necessárias no equipamento experimental e no laboratório, para que dados experimentais confiáveis fossem obtidos. A coluna apresenta um diâmetro interno de 155mm e uma altura de empacotamento máxima de 1,1m. O objetivo principal foi estudar a hidrodinâmica de uma coluna empacotada, com ênfase na determinação experimental das retenções dinâmica e estática de líquido, utilizando-se os métodos do esgotamento e o volumétrico, respectivamente. Primeiramente, verificou-se como as condições operacionais afetam a formação das retenções dinâmica e estática de líquido. Posteriormente, realizou-se um estudo da influência da utilização de um distribuidor para a fase líquida. Finalmente, experimentos foram realizados para se verificar a influência da viscosidade sobre a retenção dinâmica de líquido no recheio em estudo e dados de tensão superficial diferentes de duas soluções com mesma viscosidade foram obtidos.

Foi verificado que as retenções dinâmica e estática de líquido são fortemente afetadas pelo fluxo de líquido e são praticamente independentes do fluxo gasoso. Verifica-se que o aumento da viscosidade do sistema, trabalhando-se com uma mesma carga líquida, aumenta consideravelmente a retenção dinâmica. A utilização de um distribuidor para a fase líquida aumenta a retenção dinâmica de líquido

quando se trabalha com soluções de baixa viscosidade e não apresenta nenhum considerável efeito para soluções viscosas.

ABSTRACT

Packed columns have been used in industrial separation processes. The importance in studying the main parameters of this process is due to the fact that it can be found reliable and reasonable methods for the design of columns with structured packing, being the liquid hold-up in packed columns one of the principal characteristic in getting the correct prediction of the key parameters of the design of such columns.

The starting point of this work had as aim the acquisition of the structured commercial packing Mellapak 500Y. Subsequently, was made the design and installation of the column and the necessary adaptations in the equipment and in the laboratory for getting reliable experimental data. The column has a inner diameter of 155mm and a maximum packed height of 1,1m. The principal objective was to study the hydrodynamic of a packed column, with emphasis in the experimental determination of the dynamic and static hold-ups, using the draining and volumetric methods, respectively. Subsequently, experiments were carried out to study the influence of the use of a distributor for the liquid phase in the formation of the liquid hold-up. Finally, experiments were made to verify the influence of the viscosity of the liquid phase on it. Surface tension data of two solutions with the same viscosity were obtained.

It is verified that the dynamic and static liquid hold-ups are strongly affected by the liquid flow and is almost independent of the gas flow. It can be found that the increase of the viscosity of the systems, working with the same liquid flow, considerably, increases the dynamic hold-up. The use of a distributor to the liquid phase increases the dynamic liquid hold-up working with low viscosity solution and does not present any considerable effect for viscous solution.

NOMENCLATURA

- a: área geométrica do recheio (m^2/m^3)
- a_h : área hidráulica do recheio (m^2/m^3)
- A_{st} : área da seção transversal da coluna (m^2)
- C_L : carga líquida (m^3/m^2h)
- Fator-F: carga gasosa ($m/s(kg/m^3)^{0,5}$)
- Fr_L : número de Froude para a fase líquida
- g: aceleração da gravidade (m/s^2)
- h: altura total de empacotamento (m)
- h_t : retenção total de líquido (m^3/m^3)
- h_D : retenção dinâmica de líquido (m^3/m^3)
- h_S : retenção estática de líquido (m^3/m^3)
- h_o : retenção operacional de líquido (m^3/m^3)
- h_{L1} : retenção de líquido (m^3/m^3)
- h_{Tot} : retenção total de líquido (m^3/m^3)
- h_L : retenção total de líquido até o ponto de carga da coluna (m^3/m^3)
- $h_{L,S}$: retenção total de líquido nas condições de carregamento (m^3/m^3)
- $h_{L,FI}$: retenção total de líquido no ponto de inundação (m^3/m^3)
- h'_L : retenção total de líquido até o ponto de inundação (m^3/m^3)
- $\%h_D$: porcentagem de retenção dinâmica por volume de leito empacotado
- $\%h_S$: porcentagem de retenção estática por volume de leito empacotado
- $\%h_t$: porcentagem de retenção total por volume de leito empacotado
- M: massa molecular do gás
- $N_{Bo,L}$: número de Bond para a fase líquida
- $N_{Fr,L}$: número de Froude para a fase líquida
- $N_{Ga,L}$: número de Galileo para a fase líquida
- P: pressão operação (atm)
- Q_G : vazão gasosa (m^3/h)
- Q_L : vazão líquida (kg/h)
- r: raio da coluna (m)

R: constante universal dos gases

Re_L : número de Reynolds para a fase líquida

T: temperatura de operação ($^{\circ}C$)

V_{EE} : volume empacotado específico (m^3)

V_L : vazão líquida (l/h)

u_G : velocidade superficial gasosa (m/s)

$u_{G,FI}$: velocidade superficial gasosa no ponto de inundação (m/s)

$u_{G,S}$: velocidade superficial gasosa nas condições de carregamento (m/s)

u_L : velocidade superficial líquida (m/s)

LETRAS GREGAS

ε : fração de vazios (m^3/m^3)

η_L : viscosidade líquida (kg/ms)

η_W : viscosidade da água à 20°C (kg/ms)

μ_L : viscosidade dinâmica líquida (cP)

$\mu_{L,0}$: viscosidade dinâmica da água à 20°C (cP)

ρ_L : densidade líquida (kg/m^3)

ρ_W : densidade da água à 20° (kg/m^3)

ρ_G : densidade gasosa (kg/m^3)

σ_L : tensão superficial líquida (N/m)

ϕ : ângulo de corrugação do recheio

PARÂMETRO

π : 3,1416

CONSTANTES

c : constante (correlação de Spiegel e Suess (1992))

C_h : característica da geometria do recheio (correlação de Billet e Schultes (1993))

C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 : constantes (correlação de Engel *et al.* (1997))

x : constante (correlação de Spiegel e Suess (1992))

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DA TESE	1
CAPÍTULO II – IMPORTÂNCIA E DESENVOLVIMENTO NA ÁREA DE RETENÇÃO DE LÍQUIDO EM COLUNAS EMPACOTADAS	5
II.1 – IMPORTÂNCIA	5
II.2 – MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA RETENÇÃO DE LÍQUIDO	5
II.2.1 - INTRODUÇÃO	5
II.2.2 – MÉTODOS DE MEDIDAS	6
II.2.2.1 - MÉTODO DO ESGOTAMENTO	6
II.2.2.2 – MÉTODO VOLUMÉTRICO	6
II.2.2.3 - MÉTODO DA PESAGEM	7
II.2.2.4 - MÉTODO DA TÉCNICA DO PASSO DESCENDENTE (TÉCNICA TRAÇO)	7
II.2.2.5 - TÉCNICA DE ABSORÇÃO POR RAIOS GAMA	7
II.3 – RETENÇÃO (“HOLDUP”) DE LÍQUIDO	8
II.4 - RECHEIO ESTRUTURADO MELLAPAK 500Y	14
MELLAPAK 500Y	17
II.5 – EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE UM DISTRIBUIDOR PARA FASE LÍQUIDA	19
II.6 – INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE	20
II.7 - CORRELAÇÕES E EQUAÇÕES DISPONÍVEIS NA LITERATURA PARA A PREDIÇÃO DA RETENÇÃO DE LÍQUIDO EM COLUNAS EMPACOTADAS COM RECHEIOS ESTRUTURADOS	21
II.7.1 – EQUAÇÃO DE BILLET E SCHULTES (1991)	21
II.7.2– CORRELAÇÃO DE SUESS E SPIEGEL (1992)	24
II.7.3 – EQUAÇÃO DE BILLET E SCHULTES (1993)	25
II.7.4 – EQUAÇÃO DE ENGEL <i>ET AL.</i> (1997)	28
II.8 – PARÂMETROS DE PROJETO	30
II.8.1 – ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA COLUNA	30
II.8.2 – VOLUME EMPACOTADO ESPECÍFICO	30
II.8.3 – VELOCIDADE SUPERFICIAL GASOSA	31
II.8.4 – DENSIDADE GASOSA	31
II.8.5 – CARGA GASOSA	31
II.8.6 – VAZÃO LÍQUIDA	32
II.8.7 – CARGA LÍQUIDA	32
II.8.8 – VELOCIDADE SUPERFICIAL LÍQUIDA	32
II.8.9 - % RETENÇÃO DE LÍQUIDO	33
II.9 – A UTILIZAÇÃO DE COLUNAS PILOTO	34
II.10 – CONCLUSÕES PRELIMINARES	34
CAPÍTULO III - METODOLOGIA EXPERIMENTAL	36
III.1 – OBTENÇÃO DO RECHEIO ESTRUTURADO MELLAPAK 500Y E CONSTRUÇÃO DA COLUNA DE OPERAÇÃO	36

III.2 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL	36
III.3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	40
III.4 - OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DAS SOLUÇÕES LÍQUIDAS	42
III.4.1 – VISCOSIDADE DAS SOLUÇÕES LÍQUIDAS	42
III.4.2 – DENSIDADE DAS SOLUÇÕES LÍQUIDAS	42
III.4.3 – TENSÃO SUPERFICIAL DAS SOLUÇÕES LÍQUIDAS	42
III.5 – CONCLUSÕES PRELIMINARES	43
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
IV.1 – CURVAS DE CALIBRAÇÃO	44
IV.2 – OBTENÇÃO DOS ESTADOS ESTACIONÁRIOS PARA AS SOLUÇÕES LÍQUIDAS	45
IV.3 – INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS, DA VISCOSIDADE E DO DISTRIBUIDOR DE LÍQUIDO SOBRE A RETENÇÃO DINÂMICA DE LÍQUIDO.	48
IV.3.1 – INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS	48
IV.3.2 – INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE UM DISTRIBUIDOR PARA A FASE LÍQUIDA	57
IV.3.3 – INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE	60
IV.4 – INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS NA FORMAÇÃO DA RETENÇÃO ESTÁTICA DE LÍQUIDO	62
IV.5 – COMPARAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS PARA A RETENÇÃO TOTAL E DINÂMICA DE LÍQUIDO COM DADOS EXPERIMENTAIS E CORRELAÇÕES EXISTENTES NA LITERATURA	66
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	70
CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXO I – SISTEMAS ESTUDADOS NÃO APRESENTADOS NO CORPO PRINCIPAL DA TESE	75
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DA TESE

O grande impacto das colunas empacotadas em competição direta com as colunas de pratos é um dos mais notáveis fenômenos observados pelos projetistas de sistemas de destilação nas indústrias de processos químicos durante as duas últimas décadas (Fair e Bravo,1990). Atualmente é comum para o projetista considerar recheios para todos os sistemas gás-líquido, incluindo destilação, absorção e retificação. Durante a primeira metade deste século, estas colunas eram até certo ponto grosseiramente projetadas, e suas aplicações eram geralmente limitadas para sistemas corrosivos ou para diâmetros relativamente pequenos de colunas (como por exemplo, em instalações de plantas pilotos onde flexibilidade é importante). A partir da metade do século, a situação começou a mudar, e, com o desenvolvimento de recheios que permitem o fluxo através deles, tais como os Pall ring, projetistas começaram a considerar seriamente a utilização destes recheios em grandes colunas de destilação comerciais.

A vantagem do fluxo através de recheios aleatórios foi que eles eliminaram muito da forma arrastada associada com os recheios aleatórios tradicionais, permitindo obter baixa queda de pressão sem acarretar perda da eficiência ou capacidade. O conceito de fluxo através do recheio foi estendido para o desenvolvimento de recheios estruturados, sendo que a confiabilidade para as modernas geometria se deve à Sulzer Brothers, Switzerland em 1979. Este desenvolvimento deu origem a uma grande família de recheios, os quais foram manufaturados por várias companhias, sendo não somente eficientes para transferência de massa e queda de pressão, mas também por permitir uma razoável modelagem para a predição do desempenho.

O alto custo por unidade de volume destes recheios foi uma desvantagem, quando comparados com recheios aleatórios de alta eficiência e com pratos. Portanto, a sua adoção nas indústrias de processos químicos e petroquímicos foi até certo ponto pequena.

A partir do momento que as características do desempenho dos recheios estruturados tornaram-se melhor entendidas e foi reconhecida que sua razão eficiência/queda de pressão poderia ser completamente favorável, mais aplicações seguiram-se. Portanto, é agora possível estabelecer métodos razoáveis e confiáveis para o projeto de colunas contendo elementos de recheios estruturados. Alguns dos parâmetros chaves para o projeto do processo a serem enfocados pelos projetistas são o diâmetro da coluna, a altura do leito (eficiência à transferência de massa) e a queda de pressão. Estes por sua vez, dependem das características hidráulicas do leito empacotado, tais como distribuição líquida e retenção de líquido.

É grande a importância de uma precisa obtenção de dados experimentais para a retenção total de líquido envolvendo processos de separação e obtenção de equações teóricas ou correlações empíricas ou semi-empíricas para a sua predição (Kokal e Stainstav, 1989). Estudos realizados demonstraram que a retenção de líquido dentro da coluna pode levar a melhores entendimentos do processo em relação à transferência de massa (Billet e Schultes, 1993), ao comportamento de carga (Rao, 1993), ao gradiente de pressão da fase gasosa (Buchanan, 1988; Spekuljak e Billet, 1989), à dinâmica da coluna (Billet e Mackowiak, 1988; Suess e Spiegel, 1992), aos projetos de aparelhos de suporte para as colunas empacotadas (Billet e Mackowiak, 1988; Suess e Spiegel, 1992), ao estudo do processo de destilação em batelada (Suess e Spiegel, 1992) e à área interfacial efetiva para operações difusionais utilizando colunas empacotadas (Rao, 1993). Alguns pesquisadores (citados por Rao, 1993) incluíram a retenção de líquido na coluna quando correlacionaram coeficientes de transferência de massa do filme líquido.

Schubert *et al.* (1986) relataram que a importância de se quantificar qual a fração da retenção total que é dinâmica ou estática tem levado a um número grande de esforços para se quantificar estes parâmetros, devido ao fato de que os conceitos de retenção estática e dinâmica serem amplamente utilizados para se avaliar, calcular e modelar o desempenho de colunas empacotadas. Sáez *et al.* (1991) em

seu estudo concluíram que a importância em utilizar as contribuições estáticas e dinâmicas para a retenção de líquido é devido ao fato de que vários pesquisadores utilizaram tal idéia no desenvolvimento de correlações empíricas para calcular queda de pressão e retenção líquida em fluxo escoando através de leitos empacotados.

Billet e Mackowiak (1988) relataram que a tendência em técnicas de separação térmicas tem mudado decididamente em favor da eficiência da coluna equipadas com altas capacidades e baixas quedas de pressão, ocasionando baixos custos de energia quando comparados com equipamentos convencionais. Isto é particularmente importante se o processo de separação requer um grande número de unidades de transferência e, normalmente, acarreta numa redução dos custos de capital investido. Outra vantagem destes acessórios são que eles permitem baixas temperaturas na base da coluna e são, portanto, adequados para a retificação de misturas sensíveis ao calor. Também concluíram que a dinâmica dos fluidos das fases governam a eficiência, queda de pressão e capacidade da coluna. Estes, por sua vez, são influenciados pela geometria do equipamento, pelas taxas de fluxos das fases e pelo sistema a ser separado. Outro parâmetro característico que descreve a dinâmica do fluido é a retenção de líquido por unidade de volume de enchimento, sendo a queda de pressão no leito molhado do recheio calculada a partir da retenção total de líquido e da queda de pressão no leito seco.

Recentemente, pesquisadores têm utilizado dados experimentais para formularem modelos empíricos para a área interfacial efetiva baseados nos dados da retenção de líquido na coluna e no cálculo teórico da espessura do filme, como citado por Brunazzi *et al.* (1995). Este modelo permite calcular a área interfacial efetiva sem a introdução de nenhum parâmetro de ajuste, sendo verificado que em adição às condições de operação, apenas o valor experimental da retenção de líquido é suficiente para possibilitar a avaliação da área interfacial efetiva e dos coeficientes de transferência de massa.

Neste contexto, os principais objetivos deste trabalho de tese, visando analisar parâmetros que influenciam a formação da retenção de líquido, podem ser assim sumarizados:

1. Aquisição do recheio estruturado Mellapak 500Y
2. Projeto e construção do equipamento experimental para medidas de retenção de líquido
3. Analisar visualmente e obter dados quantitativos e qualitativos das retenções dinâmicas e estáticas, compará-las com os dados existentes na literatura, com o objetivo do conhecimento operacional do sistema e obtenção de dados reprodutíveis com a metodologia experimental desenvolvida.
4. Verificar quantitativamente a influência da utilização de um distribuidor para o fluxo líquido no sistema.
5. Utilizar soluções que apresentam viscosidades diferentes, dentro das mesmas condições operacionais utilizadas para o sistema ar-água, para verificar a influência da viscosidade da mistura líquida na formação das retenções dinâmicas.

Esta dissertação tem a seguinte divisão de capítulos. No capítulo II será encontrado um relato sobre a importância e desenvolvimentos na área de retenção de líquidos em colunas empacotadas no campo de pesquisas acadêmicas e industriais. O capítulo III apresenta toda a metodologia utilizada para a construção do equipamento experimental e técnicas utilizadas para as medidas experimentais das retenções dinâmicas e estáticas. No capítulo IV e V será apresentado todos os resultados obtidos, discussões e conclusões. Finalmente no capítulo VI se encontra toda a bibliografia utilizada para a dissertação desta tese de mestrado.

CAPÍTULO II – IMPORTÂNCIA E DESENVOLVIMENTO NA ÁREA DE RETENÇÃO DE LÍQUIDO EM COLUNAS EMPACOTADAS

II.1 – IMPORTÂNCIA

Tem sido verificado que modelos descrevendo o desempenho de colunas empacotadas que utilizam enchimentos corrugados do tipo regular estão sendo desenvolvidos e implementados com grande sucesso. As principais variáveis de interesse nestes modelos são a queda de pressão, capacidade máxima e eficiência à transferência de massa. Muitos pesquisadores têm apresentado várias correlações para predizerem os parâmetros acima. Embora estas correlações sejam desenvolvidas independentemente, existe uma variável comum que une todos estes três temas: a retenção de líquido. Portanto, uma correta predição da retenção de líquido é de fundamental importância para que se possa desenvolver modelos mais rigorosos e mais gerais para predizer o desempenho de colunas empacotadas com enchimentos estruturados.

II.2 – MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA RETENÇÃO DE LÍQUIDO

II.2.1 - INTRODUÇÃO

A literatura apresenta algumas técnicas para medidas de retenção de líquido em colunas empacotadas, tais como o método de esgotamento, citado por Elgin e Weiss (1939), Jesser e Elgin (1943) e Varrier e Rao (1960-61) citado em Rao (1993); método volumétrico, citado por McNulty e Hsieh (1982) em Suees e Spiegel (1992), Billet e Mackowiak (1988) e Mackowiak (1990); método da pesagem, primeiramente citado por Shulman et. al (1955) e McNulty e Hsieh (1982) citado em Suess e Spiegel (1992); método da técnica do passo descendente, citado por Bennett e Goodridge (1970), Schubert et. al. (1986) e Kushalkar e Pangarkar (1990) e o método da absorção por raios gama, citado por Suess e Spiegel (1992).

Schubert *et al.* (1986) relataram que ambos os métodos, esgotamento e técnicas traço, têm sido sugeridos para a determinação das retenções dinâmica e estática e que nenhuma comparação crítica desses métodos tem sido realizada. A literatura relata que existe uma variação entre os valores de retenção de líquido encontrados pela utilização dos diferentes métodos de determinação, sendo que não foi encontrado nenhum trabalho que relate qual técnica é a mais adequada para se utilizar (Rao, 1993). Para a formulação de modelos teóricos a abordagem de se trabalhar com as duas definições principais de retenção de líquido são bastante úteis (Suess e Spiegel, 1992).

Urrutia et al. (1996) relataram que o método do esgotamento tem sido um dos métodos mais amplamente utilizados para medidas de retenções dinâmicas de líquido. Pelo fato de tal técnica ser subjecto de certas controversas, atualmente novas técnicas estão sob intensivos desenvolvimentos apresentando resultados promissores, sendo que a técnica do esgotamento ainda continua ser amplamente aplicada devido sua simplicidade e particularmente para recheios porosos.

II.2.2 – MÉTODOS DE MEDIDAS

II.2.2.1 - MÉTODO DO ESGOTAMENTO

O método do esgotamento é o mais indicado para a determinação da retenção dinâmica de líquido, sendo esta determinada pelo esgotamento do líquido da coluna por um período especificado de tempo, depois da interrupção simultânea dos fluxos gasoso e líquido fornecidos para a coluna.

II.2.2.2 – MÉTODO VOLUMÉTRICO

É mais indicado para a determinação da retenção estática de líquido. O método consiste em se utilizar um recipiente pré-calibrado, conhecendo-se,

portanto, seu volume, realizando-se a leitura do volume de líquido que não retorna ao recipiente pré-calibrado, após a interrupção dos fluxos de líquido e gasoso do sistema e esgotamento da coluna.

II.2.2.3 - MÉTODO DA PESAGEM

O método da pesagem é utilizado para a determinação da retenção total de líquido. Este método consiste em se obter a diferença entre o peso da coluna seca e a irrigada. Maiores informações podem ser encontradas em Shulmann *et al.* (1955).

II.2.2.4 - MÉTODO DA TÉCNICA DO PASSO DESCENDENTE (TÉCNICA TRAÇO)

O método da técnica do passo descendente é utilizado para a determinação das retenções total e estática de líquido em colunas empacotadas. O método consiste na medida da condutividade elétrica na saída da coluna de uma substância traço injetada na entrada do sistema, a qual varia linearmente com a concentração da substância traço sob o alcance investigado. Maiores informações podem ser encontradas em Bennett e Goodridge (1970).

II.2.2.5 - TÉCNICA DE ABSORÇÃO POR RAIOS GAMA

A técnica de absorção de raios gama é utilizada para a determinação da retenção total de líquido na coluna. Com a utilização desta técnica, não é possível se fazer distinções entre a retenção dinâmica de líquido e a retenção estática de líquido na coluna. Portanto, o volume total de líquido dentro da coluna é calculado, sem se considerar seu estado de movimento. Normalmente, para a medida da retenção total de líquido utiliza-se de equipamentos que medem a densidade radiométrica comercial. Os raios gamas são emitidos por uma fonte específica (^{137}Cs).

No lado oposto da coluna, um detetor mede a intensidade dos raios gama transmitida. Este detetor fornece uma taxa total dependente da intensidade da radiação e envia este para uma unidade de avaliação que transforma os pulsos a partir do total em um sinal de saída linear. Este sinal é registrado em um gráfico a partir do qual a intensidade média e as flutuações temporais são determinadas. Maiores informações podem ser encontradas em Suess e Spiegel (1992).

II.3 – RETENÇÃO (“HOLDUP”) DE LÍQUIDO

Retenção de líquido é o volume de líquido presente na forma de um filme sobre a superfície do enchimento (Suess e Spiegel, 1992).

Elgin e Weiss (1939) foram uns dos primeiros pesquisadores a estudarem visualmente e qualitativamente a formação da retenção de líquido em colunas empacotadas. Eles se restringiram somente ao estudo do sistema ar-água para a avaliação da retenção, verificando-se que a velocidade gasosa tem muito pouco efeito sobre a retenção de líquido até que o processo de inundação se inicie. A partir do momento que o fluxo gasoso começa causar um aumento na retenção de líquido, o processo continua em uma velocidade acelerando-se rapidamente visto que os dois são mutuamente dependentes. Os autores tentaram explicar este aumento observado na retenção de líquido com a taxa de fluxo gasoso, assumindo que a superfície do enchimento não está completamente molhada ou que a camada de água sobre a superfície do recheio representa somente a porção menor da retenção de líquido medido. Relatam, ainda, que um mecanismo teórico quantitativo para explicar o desempenho experimental de colunas empacotadas na zona de inundação não é ainda possível.

Os primeiros investigadores a diferenciar entre três tipos diferentes de retenção de líquido foram Shulman et. al. em 1955, com as seguintes definições:

- Retenção Total de Líquido (h_t): é definida como o líquido total no enchimento sob as condições operacionais, sendo expressa como m^3 de líquido por m^3 de enchimento.
- Retenção Estática de Líquido (h_s): é definida como o líquido no recheio que não escorre a partir do mesmo, quando o líquido fornecido para a coluna é interrompido, sendo expressa como m^3 de líquido por m^3 de enchimento.
- Retenção Operacional de Líquido (h_o): é definida como a diferença entre as retenções total e estática, sendo expressa como m^3 de líquido por m^3 de enchimento.

A relação entre as três retenções de líquido pode ser apresentada da seguinte forma:

$$h_t = h_o + h_s \quad (\text{II.1})$$

Onde:

h_t : retenção total de líquido ou retenção total (m^3/m^3)

h_o : retenção operacional de líquido ou retenção operacional (m^3/m^3)

h_s : retenção estática de líquido ou retenção estática (m^3/m^3)

Utilizando-se colunas empacotadas com recheios irregulares, Shulmann *et al.* (1955) relataram que a retenção total de líquido é quase independente da taxa de fluxo gasoso até o ponto de carga da coluna, sendo que após ultrapassado este ponto, o fluxo gasoso passa a ter grande influência na formação do mesmo. Foi notado que enchimentos de mesmo tamanho, mas manufaturados de materiais diferentes apresentaram retenções totais de líquido diferentes. Isto é explicado pelas diferenças encontradas no valor da retenção estática de líquido para enchimentos de mesmo tamanho mas manufaturados de materiais diferentes, sendo que a retenção

operacional (h_0) apresentava a mesma magnitude. Relataram também que investigações anteriores têm tratado da retenção operacional (h_0) quase que exclusivamente e que nenhuma investigação tem sido reportada para os três tipos de retenção para o qual consideráveis dados para transferência de massa estão disponíveis na literatura. No passado, acreditava-se que a retenção operacional (h_0) fosse independente da taxa de fluxo gasoso até o ponto de inundação e, então, retenções operacionais foram em muitos casos medidos em taxa gasosa zero. Este tipo de procedimento nos leva a obter valores para a retenção operacional (h_0) errôneos. Considerando-se a definição dos autores acima, a retenção operacional (h_0) representa a parte do líquido que escorre do enchimento quando o líquido fornecido à coluna é interrompido. Pode ser considerada como uma medida do líquido circulando através do recheio quando a coluna está em operação ou pode também ser vista como a porção móvel da retenção total que está realmente tendo parte no processo de transferência de massa gás-líquido. Por isso, a retenção operacional (h_0) é um importante parâmetro no processo de transferência de massa gás-líquido, como também relatado por Rao (1993). Foi verificado que a retenção operacional (h_0) é independente da superfície do recheio. Os autores relataram que a retenção estática (h_S) é independente das taxas de fluxo gasoso e líquido, mas é dependente da natureza da superfície dos enchimentos, ou seja, a retenção estática (h_S) é uma função das propriedades superficiais tais como tensão superficial, pois é esperado que líquidos com diferentes propriedades físicas e químicas molhariam superfícies sólidas diferentemente. Os autores concluíram que a retenção estática (h_S) é relativamente ineficiente para absorção física e absorção química rápida, devido ao fato de que eles saturam-se rapidamente. Contudo, essa mesma região estagnada é completamente efetiva para processos de evaporação e absorção química com velocidade moderada.

Alguns anos mais tarde, Hoogerdoorn e Lips (1965), citado em Rao (1993) e Kushalkar e Pangarkar (1990), Bennett e Goodridge (1970), Kan e Greenfield (1983), citado em Rao (1993) e Kushalkar e Pangarkar (1990), Schubert *at al.*

(1986), Kushalkar e Pangarkar (1990) e Suess e Spiegel (1992) declararam que a retenção de líquido em colunas empacotadas pode ser melhor definida através de dois componentes principais, um relativamente rápido, movendo-se, chamado de retenção dinâmica (h_D) e outro relativamente estagnado conhecido por retenção estática (h_S). A retenção total é constituída pela soma das retenções dinâmica e estática.

Bennett e Goodridge (1970) relataram que a transferência de massa pode se realizar entre as duas regiões, embora o mecanismo ainda não seja especificado. O líquido estagnado é esperado ser encontrado predominantemente nos pontos de contato entre elementos do recheio, entre elementos do recheio e a parede da coluna, assim como nas regiões de baixa taxa de fluxo local. Os autores verificaram que a razão da retenção estática (h_S) pela dinâmica (h_D) é independente da taxa de fluxo gasoso e decai com o fluxo líquido. Os autores também verificaram que o volume do líquido estagnado não é afetado pela taxa de fluxo gasoso e também é independente da taxa de fluxo líquido e comprimento do leito. Foi verificado que a quantidade de líquido estagnado determinada a partir da técnica do passo descendente é muito menor do que aquelas retenções estáticas (h_S) encontradas a partir do esgotamento da coluna. Como explicação para esta diferença, os autores sugeriram que quando o líquido esgota sob gravidade a partir de um leito empacotado, alguma força, tal como tensão superficial, poderia levar a uma certa retenção estática de líquido (h_S) maior dentro do sistema.

Schubert *et al.* (1986) relataram que a quantidade de retenção estática (h_S) obtida pelo método da técnica do passo descendente é muito menor do que os resultados anteriores obtidos por Shluman *et al.* (1955) utilizando o método do esgotamento. Os autores também utilizaram o método do esgotamento para determinar a retenção dinâmica (h_D) e verificaram que a retenção estática obtida pela diferença entre a retenção total (h_T), obtida pela técnica do passo descendente, e a retenção dinâmica (h_D), obtida pelo método do esgotamento, foram

significativamente maiores do que aquelas determinadas pela técnica do passo descendente. Os autores concluíram que seus dados e os dados de Bennett e Goodridge (1970) indicam que, em geral, existem substanciais desacordos entre as retenções estáticas (h_s) determinadas pelo método do esgotamento e pela técnica do passo descendente. Os autores relataram que a diferença entre as retenções estáticas (h_s) determinadas pelos métodos do esgotamento e traço é provavelmente devido ao líquido espalhado através das regiões do enchimento e que permanece retido no mesmo depois do esgotamento sendo que este pode permanecer irrigado durante a operação da coluna.

Kushalkar e Pangarkar (1990) afirmaram que uma descrição completa do fluxo da fase líquida numa coluna empacotada requer o conhecimento da retenção de líquido total (h_T), dinâmica (h_D) e estática (h_s). Os autores relataram que a diferença básica entre os métodos traço e do esgotamento é que em experimentos traço, a hidrodinâmica da coluna não é perturbada como durante o método do esgotamento. Em segundo lugar, os autores relataram que o método do esgotamento mede o líquido que permanece preso no recheio e nas juntas, assim como, o líquido que permanece agarrado nos enchimentos devido às forças superficiais. Sob condições irrigadas, uma parte significativa deste líquido poderia estar movendo-se, reduzindo-se, então, a retenção estática (h_s), podendo portanto, esclarecer as diferenças encontradas no valor da retenção estática (h_s) determinadas pelo método traço e aquela determinada por Shulman *et al.* (1955) pelo método do esgotamento. A retenção estática (h_s) determinada pelos autores mostra um evidente aumento com a velocidade líquida. Em altas velocidades líquidas ele alcança um valor constante. Este efeito é provavelmente devido ao fato de que quando a velocidade líquida aumenta, mais superfície é percorrida pelo fluxo de líquido devido ao aumento do espalhamento (difusão) radial de líquido, devido ao fato de que os enchimentos no presente trabalho não foram pré-inundados ou pré-molhados, e quando utiliza-se o método pré-molhado (Schubert *et al.*, 1986), todo o recheio é pré-molhado e, portanto, o efeito da velocidade líquida sobre a retenção estática (h_s)

não é notada. Alguns outros pesquisadores (Shulman et al., 1955 e Bennett e Goodridge, 1970) também obtiveram um valor constante para a retenção estática (h_S) quando determinados pelos métodos do esgotamento e traço. Estes pesquisadores obtiveram a retenção estática pela extrapolação de gráficos da retenção total versus velocidade líquida superficial, para velocidade líquida superficial igual a zero, sendo, portanto, este valor único para cada recheio e sua interceptação sobre o eixo vertical tem também de ser um valor único. Portanto, este método não pode diferenciar retenções estáticas (h_S) para diferentes velocidades líquidas superficiais.

Sáez et al. (1991) em seu estudo sobre leitos empacotados definiram retenção estática (h_S) como a fração de volume de líquido, referente ao volume do leito total, que permanece no leito após o esgotamento completo, relatando que o líquido que permanece no leito está impedido de esgotar por um balanço entre as forças gravitacionais e tensões superficiais. Os autores também relataram que a retenção estática (h_S) é também relevante na modelagem de misturas e processos de transporte gás-líquido, fluindo através de leitos empacotados, na qual uma quantidade de líquido equivalente à retenção estática (h_S) é comumente considerada como uma região estagnada sob condições de fluxo gás-líquido.

Suess e Spiegel (1992) estudaram a retenção de líquido para três tipos de recheio Mellapak. Seus dados demonstram que a inundação se inicia onde dois elementos de recheio fazem contato um com o outro, caracterizando a retenção de líquido como uma propriedade local do recheio acima do ponto de carga. Os autores caracterizaram ponto de carga como a condição onde a retenção de líquido aumenta bruscamente, provavelmente, devido a uma forte interação entre as fases gasosa e líquida e como ponto de inundação, a condição onde a operação do sistema em contracorrente não é mais possível. Os resultados experimentais indicam que para baixas cargas líquidas a retenção total (h_T) é quase horizontal até o ponto de carga (Pinto *et al.* (1997)). Acima do ponto de carga a retenção total (h_T) aumenta com o

aumento do fluxo gasoso, provavelmente devido às fortes interações entre o gás e o líquido. Este último comportamento ainda não pode ser explicado teoricamente, mas certamente indica uma mudança no regime de fluxo, vindo ao encontro com os dados de Weiland e Ahlgren (1993). Como Suess e Spiegel (1992) estudaram três tipos de recheios Mellapak, apresentando três áreas geométricas diferentes, verificou-se uma importante influência deste parâmetro na formação da retenção total de líquido (h_T).

Billet e Schultes (1993) e Weiland e Ahlgren (1993) relataram que um preciso conhecimento das características de ambas as fases em um enchimento é uma das necessidades fundamentais para o projeto ótimo de colunas de absorção, desorção e retificação com relação à dinâmica do fluido e engenharia de processo, sendo que uma particular importância é dada à retenção de líquido. Também relataram que a retenção de líquido afeta a queda de pressão na fase gasosa e governa a eficiência à transferência de massa em uma coluna empacotada.

Em seu trabalho Rao (1993) tem relatado que muitos pesquisadores têm identificado a retenção de líquido como uma variável fortemente dependente da fase líquida. Neste estudo, foi verificado que os valores da retenção operacional (h_0), também conhecida por retenção dinâmica (h_D) de líquido circulando na forma de um filme sobre o enchimento depende principalmente das taxas de fluxos do fluido, propriedades físicas do líquido e características dos enchimentos utilizados.

II.4 - RECHEIO ESTRUTURADO MELLAPAK 500Y

Foram originalmente desenvolvidos pela Sulzer Brothers Company para satisfazer a uma demanda especial de colunas de destilação que requerem um número grande de estágios. Com o passar do tempo, seu alcance de utilização aumentou. Ambos os recheios, gauze (BX e CY) e Mellapak, são amplamente

utilizados numa grande variedade de operações unitárias e processos além da destilação (Bomio *et al.* 1988).

Billet e Schultes (1991) relataram que nos últimos anos, enchimentos novos altamente efetivos têm sido desenvolvidos para colunas de absorção, desorção e retificação utilizadas para a separação de misturas líquidas e gasosas nas indústrias de processos. Eles apresentam poucos problemas de distribuição líquida, áreas interfaciais grandes e reduzidas quedas de pressão na fase gasosa. Um dos enchimentos estruturados mais utilizados é o tipo Mellapak (Sulzer Brothers Ltda), sendo relatado por Stikkelman *et al.* (1989) que tal enchimento vêm sendo utilizado desde 1977.

Billet e Schultes (1993) em seu estudo verificaram que a geometria e o tamanho dos modernos recheios são os principais parâmetros que governam o fluxo das várias fases e também a eficiência da coluna. O líquido deve fluir na forma de um filme fino e ser distribuído tão uniformemente quanto possível sob toda a seção transversal da coluna, assegurando efetiva transferência de massa e moderadas quedas de pressão (Brito *et al.* (1994), Brunazzi *et al.* (1995)), quando comparados com recheios irregulares. A superfície do recheio deveria estar molhada tanto quanto possível e o fluxo de gás em contracorrente deveria também estar uniformemente distribuído sob toda a seção transversal da coluna. Portanto, os fatores que governam a dinâmica do fluido e a transferência de massa em uma coluna são as propriedades físicas do sistema, seu alcance, capacidade e a forma e a estrutura do recheio.

Primeiramente, o enchimento Sulzer foi manufaturado de metal tela (gauze), e posteriormente de chapas de metais. Atualmente, existem recheios manufaturados de diversos tipos de materiais, entre eles os de aço inoxidável, cerâmicos, carbono e vários tipos de plásticos.

O enchimento estruturado Mellapak têm uma estrutura regular como apresentado na figura II.1:

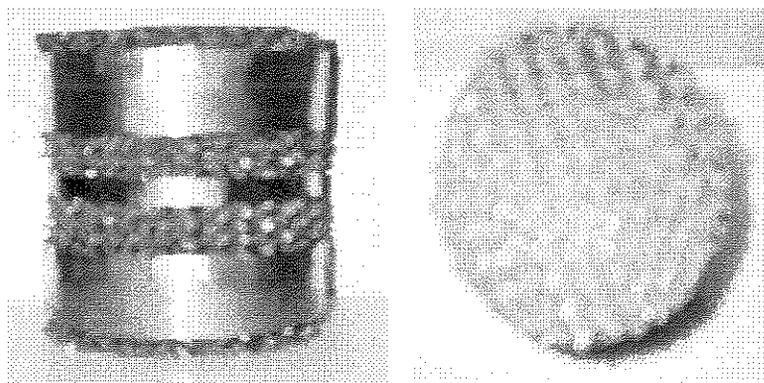


FIGURA II.1 – O Recheio Estruturado Mellapak 500Y

O recheio consiste de elementos estruturados que preenchem toda a seção transversal da coluna. Elementos sucessivos são orientados em 90 graus um em relação ao outro, respectivamente. Cada elemento consiste de chapas de metais, ou outro tipo de material, corrugadas em aço inoxidável em paralelo. As corrugações estão orientadas em um ângulo ϕ com relação ao eixo vertical. As corrugações das camadas adjacentes estão ordenadas em lados opostos da torre. Pela variação das dimensões geométricas das corrugações, a área geométrica específica (a_p) do enchimento pode ser ajustada sob um amplo alcance.

Atualmente, são manufaturados doze tipos de enchimentos Mellapak. Neste trabalho será estudado o enchimento Mellapak 500Y. A nomenclatura dos enchimentos é baseada nos dois parâmetros introduzidos acima: Y significa um ângulo ϕ de aproximadamente 45 graus. O número 500 indica a área geométrica específica do enchimento em m^2/m^3 , ou seja, o enchimento Mellapak 500Y apresenta uma área geométrica específica de $500m^2/m^3$.

A tabela II.1 apresenta as principais características referentes ao enchimento Mellapak 500Y.

Tabela II.1 - Características dimensionais do enchimento Mellapak 500Y

TIPO:	MELLAPAK 500Y
Material:	Aço inoxidável 316
Ângulo de Corrugação (ϕ):	45 graus
Área Superficial Geométrica (A_p):	500 m ² /m ³
Fração de Vazios (ϵ):	0,975 m ³ /m ³

Billet e Mackowiak (1988) relataram que enchimentos entrelaçados (estruturados) foram estudados compreensivamente em experimentos de desorção, absorção e retificação. Os resultados revelam que eles podem ser considerados como enchimentos de alto desempenho devido à sua alta eficiência, alta capacidade e baixa queda de pressão. Também foi verificado que eles poderiam ser utilizados para separação de misturas sensíveis ao calor e para aquelas requerendo um grande número de unidades de transferência sob condições que permitam um consumo mínimo de energia. Verificaram, também, em seu estudo que enchimentos estruturados apresentam uma queda de pressão muito menor por estágio teórico quando comparados a enchimentos convencionais da mesma dimensão .

Robinson (1991) apresentou uma tabela das propriedades relativas com relação aos internos da coluna, como mostrado pela tabela II.2.

Tabela II.2 - Propriedade Relativa dos Internos da Coluna

Queda De Pressão	Pratos	Alta
	Recheio Aleatório	Alta
	Recheio Estruturado	Baixa
Capacidade em Mesma Eficiência	Pratos	Baixa
	Recheio Aleatório	Alta
	Recheio Estruturado	Alta
Eficiência em Mesma Capacidade	Pratos	Baixa
	Recheio Aleatório	Alta
	Recheio Estruturado	Alta
Desempenho em Taxa Líquida Baixa	Pratos	Melhor
	Recheio Aleatório	Melhor
	Recheio Estruturado	Pior
Desempenho em Taxa Líquida Alta	Pratos	Pior
	Recheio Aleatório	Melhor
	Recheio Estruturado	Melhor

Em um de seus periódicos (Periódico I), a Sulzer Brothers Company, relatou que o recheio estruturado Mellapak apresenta as seguintes características especiais:

- Queda de pressão por estágio teórico: 0,3 à 1,0mbar
- Queda de pressão à 70-80% da inundação: aproximadamente 2mbar/m
- Carga líquida mínima: $0,2\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- Carga líquida máxima: $> 200\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$

II.5 – EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE UM DISTRIBUIDOR PARA FASE LÍQUIDA

Billet e Mackowiak (1988) afirmaram que enchimentos arranjados numa forma geométrica e uniforme têm fornecido sucesso na prática, mesmo em colunas com diâmetros grandes, contanto que os leitos tenham sido cuidadosamente instalados e o líquido seja uniformemente distribuído. Má distribuição, que é freqüentemente observada em leitos empacotados convencionalmente, prejudicando a eficiência, podem ser largamente evitados pela utilização de dispositivos que distribuem o líquido inicialmente no sistemas e dispositivos que redistribuem todo o líquido que pode fluir pelas paredes.

Stikkelman et al. (1989) indicaram que grande parte da literatura sobre má distribuição em colunas empacotadas, equipadas com enchimentos estruturados, tem sido produzidas por pesquisadores da Sulzer Brothers Ltda. Foi verificado que uma má distribuição inicial do líquido é encontrada na primeira parte (elemento) do enchimento, causando um decréscimo na eficiência de separação. Se a distribuição de líquido inicial for satisfatória, o enchimento também distribuirá o líquido uniformemente, exceto quando não existe molhamento. Também relataram que não foi verificado nenhuma influência significativa do diâmetro da coluna e que o fluxo natural é de fato estabelecido após dois elementos de enchimento, considerando que um distribuidor de líquido corretamente projetado é utilizado. Em adição, a má distribuição aumenta sobre a aplicação de baixas cargas líquidas.

Fair e Bravo (1990) relataram que em discussões considerando a disponibilidade de superfícies metálicas para o molhamento líquido ou para transferência de massa, o assunto da distribuição líquida em leitos empacotados não tem sido mencionado. É bem conhecido que a distribuição inicial do líquido no leito de enchimentos estruturados é criticamente importante. Observações mostram que pelo menos 12 pontos de despejamento por ft^2 (aproximadamente 130 pontos/m^2) de seção transversal de área da torre são necessários. A mudança na distribuição do

líquido quando ele flui para baixo através do enchimento não tem sido ainda investigado o bastante para que o perfil de molhamento seja predito. Em seu trabalho, Fair e Bravo (1990) indicaram dois trabalhos que trataram de aspectos práticos da distribuição de líquido e projeto do distribuidor, fornecendo dados, modelando resultados e critérios de projeto que podem ser muito úteis para os projetistas. É assumido que o projetista optaria por uma boa distribuição inicial de líquido (assim como para a fase gasosa) e seria cuidadoso com o objetivo de minimizar efeitos de parede.

II.6 – INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE

A influência da viscosidade para quatro tipos de enchimentos Mellapak foi investigada por Suess e Spiegel (1992). Eles realizaram somente um estudo qualitativo da influência da viscosidade sobre a formação da retenção total de líquido (h_T), utilizando o líquido trietilenoglicol (TEG) e soluções aquosas de monodietanolamina (MDEA), variando-se a viscosidade entre 6 e 30CP.

A partir das medidas, a influência da viscosidade sobre a retenção de líquido total pode ser descrita através do seguinte fator de correção:

$$\left(\frac{\mu_L}{\mu_{L,0}} \right)^{0,25} \quad \text{II.2}$$

Onde:

μ_L : viscosidade dinâmica líquida (cP)

$\mu_{L,0}$: viscosidade dinâmica da água à 20⁰C (cP)

II.7 - CORRELAÇÕES E EQUAÇÕES DISPONÍVEIS NA LITERATURA PARA A PREDIÇÃO DA RETENÇÃO DE LÍQUIDO EM COLUNAS EMPACOTADAS COM RECHEIOS ESTRUTURADOS

Fair e Bravo (1990) relataram que até o momento nenhuma correlação ou modelo para uma correta predição da retenção de líquido em colunas empacotadas com recheios estruturados foi desenvolvida. Em seu trabalho Brunazzi *et al.* (1995) relataram que uma correta predição da retenção de líquido é necessária para estimar a velocidade efetiva da fase líquida e, portanto, o coeficiente de transferência de massa da fase líquida, e para calcular a área interfacial.

II.7.1 – EQUAÇÃO DE BILLET E SCHULTES (1991)

Estes autores assumiram que o fluxo em um leito empacotado é equivalente a uma multiplicidade de canais de fluxo através do qual o líquido flui para baixo como um filme fino. Desprezando-se as forças de inércia, as forças de gravidade e cisalhamento num filme de fluxo laminar estão em equilíbrio com as forças de atrito por uma tensão de cisalhamento na fase gasosa na superfície do filme. Utilizando as considerações teóricas acima, os autores chegaram à seguinte equação para a retenção total de líquido válida até o ponto de carga da coluna:

$$h_L = h_{L,S} = \left(\frac{12 \eta_L u_L a^2}{g \rho_L} \right)^{1/3} \quad (\text{II.3})$$

Onde:

$h_{L,S}$: retenção total líquido nas condições de carregamento (m^3/m^3)

h_L : retenção total de líquido até o ponto de carga da coluna (m^3/m^3)

u_L : velocidade superficial líquida (m/s)

a : área geométrica do recheio (m^2/m^3)

g : aceleração da gravidade (m/s^2)

ρ_L : densidade líquida (kg/m^3)

η_L : viscosidade dinâmica líquida (kg/ms)

Os autores relataram que a predição da retenção de líquido na equação acima é restrita ao alcance estendendo até o ponto de carga da coluna. Através da figura abaixo os autores mostraram a relação fundamental entre o acúmulo de líquido e a razão da velocidade gasosa pela velocidade gasosa no ponto de inundação.

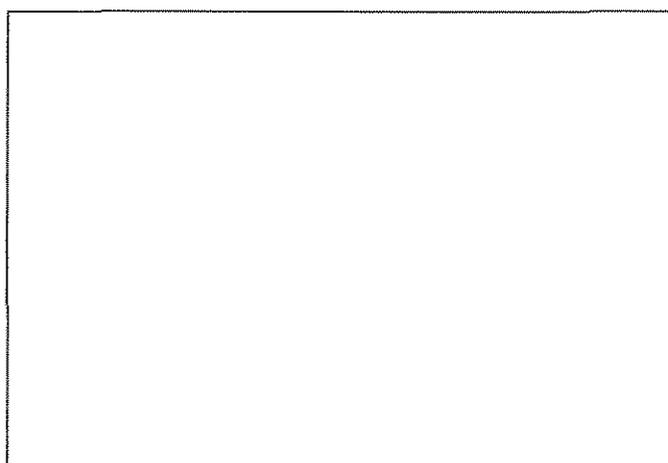


Figura II.2 – Relação Fundamental entre a Retenção de Líquido e a Velocidade Gasosa para Colunas com Fluxo em Contracorrente.

Onde:

$h_{L,S}$: retenção total de líquido nas condições de carregamento (m^3/m^3)

$h_{L,FI}$: retenção total de líquido no ponto de inundação (m^3/m^3)

$u_G/u_{G,FI}$: razão da velocidade gasosa pela velocidade gasosa no ponto de inundação (velocidade gasosa relativa)

$u_{G,S}/u_{G,FI}$: razão da velocidade gasosa nas condições de carregamento pela velocidade gasosa no ponto de inundação (velocidade gasosa relativa)

Até o ponto de carga (S), a retenção total de líquido ($h_{L,S}$) é praticamente independente da velocidade gasosa. Acima deste ponto, as forças de cisalhamento, agindo no gás, sustentam o filme líquido até que a retenção de líquido no ponto de

inundação atinja o valor de $h_{L,FI}$. Estas condições limites são descritas pelas equações abaixo:

$$\text{Para } u_G / u_{G,FI} = 0 \Rightarrow h_{L1} = h_{L,S}$$

$$\text{Para } u_G / u_{G,FI} = 1 \Rightarrow h_{L1} = h_{L,FI}$$

Utilizando-se a relação fundamental e as condições limites apresentadas acima, os autores chegaram à seguinte equação empírica para a retenção de líquido, válida até o ponto de inundação da coluna, com o expoente (13) obtido através de investigações experimentais. O termo entre parênteses na equação da retenção de líquido no ponto de inundação representa os efeitos da viscosidade e da densidade da substância (subscrito L) comparados aos correspondentes valores para a água a 20°C (subscrito W).

$$h'_L = h_{L,S;eq. II.3} + (h_{L,FI} - h_{L,S;eq. II.3}) \left(\frac{u_G}{u_{G,FI}} \right)^{13} \quad (II.4)$$

$$h_{L,FI} = 0,3741 \varepsilon \left(\frac{\eta_L \rho_W}{\eta_W \rho_L} \right)^{0,05} \quad (II.5)$$

Onde:

h_{L1} : retenção de líquido

h'_L : retenção total de líquido até o ponto de inundação (m^3/m^3)

$h_{L,S}$: retenção total de líquido nas condições de carregamento (m^3/m^3)

$h_{L,FI}$: retenção total de líquido no ponto de inundação (m^3/m^3)

u_G : velocidade superficial gasosa (m/s)

$u_{G,S}$: velocidade superficial gasosa nas condições de carregamento (m/s)

$u_{G,FI}$: velocidade superficial gasosa no ponto de inundação (m/s)

ε : fração de vazios (m^3/m^3)

η_L : viscosidade dinâmica líquida (kg/ms)

η_w : viscosidade dinâmica da água a 20⁰C (kg/ms)

ρ_L : densidade líquida (kg/m³)

ρ_w : densidade da água a 20⁰C (kg/m³)

As equações acima são válidas para $0 < u_L < 200$ (m³/m²h) e $\eta_L > 10^{-4}$ (kg/ms).

II.7.2– CORRELAÇÃO DE SUESS E SPIEGEL (1992)

Em 1992, Suess e Spiegel (1992) estudaram três tipos de recheio Mellapak, realizando um estudo qualitativo da viscosidade, apresentando uma correlação empírica, válida para prever a retenção de líquido até o ponto de carga da coluna, com 10% de precisão.

$$h_L = ca^{0,83} (C_L)^x \left(\frac{\mu_L}{\mu_{L,0}} \right)^{0,25} \quad (\text{II.6})$$

para:

$C_L < 40$ (m³/m²h): $c = 0,0169$ e $x = 0,37$

$C_L > 40$ (m³/m²h): $c = 0,0075$ e $x = 0,59$

Onde:

h_L : retenção total de líquido até o ponto de carga da coluna (m³/m³)

a : área geométrica do enchimento (m²/m³)

C_L : carga líquida (m³/m²h)

μ_L : viscosidade dinâmica líquida (cP)

$\mu_{L,0}$: viscosidade dinâmica da água à 20⁰C

c : constante

x : constante

Brunazzi et al. (1995) compararam seus dados obtidos experimentalmente, na ausência de fluxo gasoso, com os dados obtidos pela utilização da correlação de Suess e Spiegel (1992), verificando bons acordos entre os dados experimentais e aqueles obtidos pela utilização da correlação acima.

II.7.3 – EQUAÇÃO DE BILLET E SCHULTES (1993)

A primeira suposição realizada pelos autores na formulação deste modelo é que o espaço livre efetivo na coluna é equivalente a uma multiplicidade de canais de fluxos verticais, onde os fios de líquido descem ao longo da parede em contracorrente com o fluxo gasoso subindo. Desprezando-se as forças de inércia, as forças de gravidade e cisalhamento num filme de fluxo laminar estão em equilíbrio com as forças de atrito por uma tensão de cisalhamento na fase vapor na superfície do filme. Utilizando-se as considerações acima, os autores chegaram ao seguinte modelo teórico para a retenção de líquido válida até o ponto de carga da coluna.

$$h_L = \left(\frac{12\eta_L a^2 u_L}{\rho_L g} \right)^{1/3} \left(\frac{a_h}{a} \right)^{2/3} \quad (\text{II.7})$$

Onde:

h_L : retenção total de líquido até o ponto de carga da coluna (m^3/m^3)

u_L : velocidade superficial líquida (m/s)

a : área geométrica do recheio (m^2/m^3)

g : aceleração da gravidade (m/s^2)

ρ_L : densidade líquida (kg/m^3)

η_L : viscosidade dinâmica líquida (kg/ms)

a_h : área hidráulica do recheio (m^2/m^3)

O expoente 2/3 da equação acima, resultante a partir do modelo, tem sido confirmado por resultados experimentais sobre ambos os leitos (estruturados e aleatórios). A razão a_h/a da equação acima tem sido determinada indiretamente a partir de estudos da dinâmica de fluidos sobre a retenção de líquido. Uma correlação para a_h/a foi obtida para 16 tipos de recheios, de várias formas e tamanhos e também para vários sistemas diferentes. Os resultados revelaram que a_h/a depende do número de Reynolds (Re_L) e de Froude (Fr_L) para o fluxo líquido, não sendo influenciado pela tensão superficial do fluxo líquido.

$$Re_L = \frac{u_L \rho_L}{a \eta_L} \quad (\text{II.8})$$

$$Fr_L = \frac{u_L^2 a}{g} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Para } Re_L < 5 : \frac{a_h}{a} = C_h Re_L^{0,15} Fr_L^{0,1}$$

$$\text{Para } Re_L \geq 5 : \frac{a_h}{a} = 0,85 C_h Re_L^{0,25} Fr_L^{0,1}$$

Onde:

Re_L : número de Reynolds para fase líquida

Fr_L : número de Froude para a fase líquida

C_h : característica da geometria do recheio

Os autores relataram que a equação obtida acima apresenta um desvio relativo médio baixo, em torno de 6,7%, quando comparada com os dados experimentais.

Para calcular a retenção de líquido acima do ponto de carga os autores sugeriram uma aproximação a qual reflete os resultados experimentais fenomenologicamente.

A retenção de líquido, em princípio, é uma função da razão da velocidade gasosa pela velocidade gasosa no ponto de inundação ($u_G/u_{G,FI}$). Abaixo do ponto de inundação, a retenção de líquido é praticamente independente da velocidade gasosa. Depois, a retenção de líquido aumenta devido às forças de cisalhamento no fluxo gasoso em contracorrente até que o ponto de inundação seja alcançado. No ponto de inundação, todo o líquido é apoiado pelo fluxo gasoso e a retenção de líquido alcança seu valor no ponto de inundação. Essas relações podem ser descritas em termos das seguintes condições limites (Fig. II.2):

$$\text{Para } u_G / u_{G,FI} = 0 \Rightarrow h_{L1} = h_{L,S}$$

$$\text{Para } u_G / u_{G,FI} = 1 \Rightarrow h_{L,1} = h_{L,FI}$$

Os autores chegaram à mesma expressão empírica (equação II.4), citada no ítem II.7.1, que satisfaz as condições limites acima, sendo que para o cálculo do acúmulo de líquido até o ponto de carga os autores utilizaram a equação II.7.

$$h'_L = h_{L,eq.II.7} + (h_{L,FI} - h_{L,eq.II.7}) \left(\frac{u_G}{u_{G,FI}} \right)^{13} \quad (II.10)$$

$$h_{L,FI} = 2,2 h_{L,eq.II.7} \left(\frac{\eta_L \rho_W}{\eta_W \rho_L} \right) \quad (II.11)$$

Onde:

h'_L : retenção total de líquido até o ponto de inundação (m^3/m^3)

$h_{L,FI}$: retenção total de líquido no ponto de inundação (m^3/m^3)

u_G : velocidade superficial gasosa (m/s)

$u_{G,FI}$: velocidade superficial gasosa no ponto de inundação (m/s)

ϵ : fração de vazios (m^3/m^3)

η_L : viscosidade dinâmica líquida (kg/ms)

η_W : viscosidade dinâmica da água a 20⁰C (kg/(ms))

ρ_L : densidade líquida (kg/m^3)

ρ_W : densidade da água a 20⁰C (kg/m^3)

O termo entre parênteses na equação II.11 no ponto de inundação representa os efeitos da viscosidade e da densidade da substância (subscrito L) comparados aos correspondentes valores para a água a 20⁰C (subscrito W).

Os autores relataram que a retenção de líquido entre os pontos de carga e inundação podem ser preditos por meio das equações II.7, II.10 e II.11 com um desvio médio relativo de 10,8%.

II.7.4 – EQUAÇÃO DE ENGEL *ET AL.* (1997)

Os autores relataram que os fatores relevantes que afetam a retenção de líquido total em uma coluna empacotada são as propriedades físicas do fluxo líquido (densidade, viscosidade dinâmica e tensão superficial), as propriedades características do recheio (porosidade e área específica do recheio), a carga líquida e a gravidade. Os autores sugerem que a retenção de líquido total pode ser representada pelo produto de três parâmetros: o número de Froude ($N_{Fr,L}$) que descreve a influência da carga líquida, o número de Galileo ($N_{Ga,L}$) que caracteriza a condição de fluxo de um filme líquido e pelo número de Bond ($N_{Bo,L}$) que caracteriza o comportamento de molhamento e esgotamento. Em adição a estes três parâmetros acima, os autores sugerem que a porosidade (ϵ) do recheio é uma variável que deve ser incorporada aos parâmetros característicos definidos acima.

Assumindo que a retenção de líquido possa ser representada como um produto dos parâmetros acima.

$$N_{Ga,L} = \frac{\eta_L^2 a^3}{\rho_L^2 g} \quad (II.12)$$

$$N_{Bo,L} = \frac{\sigma_L a^2}{\rho_L g} \quad (II.13)$$

$$N_{Fr,L} = \frac{u_L^2 a}{g} \quad (II.14)$$

$$h_{Tot} = C_1 N_{Fr,L}^{C_2} N_{Ga,L}^{C_3} N_{Bo,L}^{C_4} \epsilon^{C_5} \quad (II.15)$$

As constantes da equação II.15 foram determinadas por uma análise de regressão a partir de dados experimentais obtidos em um banco de dados. Os autores verificaram que o efeito da porosidade foi desprezível, obtendo-se a correlação II.16 para a retenção total de líquido, o qual apresenta um erro relativo médio de 15%.

$$h_{Tot} = 0,93 \left(\frac{u_L^2 a}{g} \right)^{1/6} \left(\frac{\eta_L^2 a^3}{\rho_L^2 g} \right)^{1/10} \left(\frac{\sigma_L a^2}{\rho_L g} \right)^{1/8} \quad (II.16)$$

Onde:

$N_{Ga,L}$: número de Galileo

$N_{Bo,L}$: número de Bond

$N_{Fr,L}$: número de Froude

η_L : viscosidade dinâmica líquida (kg/ms)

a : área superficial específica do recheio (m^2/m^3)

ρ_L : densidade da fase líquida (kg/m^3)

- g: aceleração da gravidade (m/s^2)
 σ_L : tensão superficial líquida (N/m)
 u_L : velocidade superficial líquida (m/s)
 ε : fração de vazios (m^3/m^3)
 $h_{Tot.}$: retenção total de líquido (m^3/m^3)
 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 : constantes

II.8 – PARÂMETROS DE PROJETO

II.8.1 – ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA COLUNA

$$A_{ST} = \pi \cdot r^2 \quad (II.17)$$

Onde:

A_{st} : área da seção transversal da coluna (m^2)

π : 3,1416

r: raio da coluna (m)

II.8.2 – VOLUME EMPACOTADO ESPECÍFICO

$$V_{EE} = A_{st} h \varepsilon \quad (II.18)$$

Onde:

V_{EE} : volume empacotado específico (m^3)

A_{st} : área da seção transversal da coluna (m^2)

h: altura total de empacotamento (m)

ε : fração de vazios (m^3/m^3)

II.8.3 – VELOCIDADE SUPERFICIAL GASOSA

$$u_G = \frac{Q_G}{A_{st} 3600} \quad (\text{II.19})$$

Onde:

v_G : velocidade superficial gasosa (m/s)

Q_G : vazão gasosa (m^3/h)

A_{st} : área da seção transversal da coluna (m^2)

II.8.4 – DENSIDADE GASOSA

Para o cálculo da densidade gasosa a lei dos gases ideais foi utilizada.

$$\rho_G = \frac{PM}{RT} \quad (\text{II.20})$$

Onde:

ρ_G : densidade gasosa (kg/m^3)

P: pressão operação (atm)

M: massa molecular do gás

R: constante universal dos gases

T: temperatura de operação (K)

II.8.5 – CARGA GASOSA

O fluxo gasoso é normalmente expressado em função do fator-F.

$$\text{fator } - F = u_G \sqrt{\rho_G} \quad (\text{II.21})$$

Onde:

Fator-F: carga gasosa ($\text{m/s}(\text{kg/m}^3)^{0.5}$)

u_G : velocidade superficial gasosa (m/s)

ρ_G : densidade gasosa (kg/m^3)

II.8.6 – VAZÃO LÍQUIDA

$$Q_L = \rho_L V_L 0,001 \quad (\text{II.22})$$

Onde:

Q_L : vazão líquida (kg/h)

V_L : vazão líquida (l/h)

ρ_L : densidade líquida (kg/m^3)

II.8.7 – CARGA LÍQUIDA

$$C_L = \frac{V_L 0,001}{A_{st}} \quad (\text{II.23})$$

Onde:

C_L : carga líquida ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$)

V_L : vazão líquida (l/h)

A_{st} : área da seção transversal da coluna

II.8.8 – VELOCIDADE SUPERFICIAL LÍQUIDA

$$u_L = \frac{V_L 0,001}{A_{st} 3600} \quad (\text{II.24})$$

Onde:

u_L : velocidade superficial líquida (m/s)

V_L : vazão líquida (l/h)

A_{st} : área da seção transversal da coluna

II.8.9 - % RETENÇÃO DE LÍQUIDO

$$\% h_D = \frac{h_D}{V_{EE}} 100 \quad (\text{II.25})$$

$$\% h_S = \frac{h_S}{V_{EE}} 100 \quad (\text{II.26})$$

$$\% h_T = \% h_D + \% h_S \quad (\text{II.27})$$

Onde:

$\% h_D$: porcentagem de retenção dinâmica por volume de leito empacotado (m^3/m^3)

$\% h_S$: porcentagem de retenção estática por volume de leito empacotado (m^3/m^3)

$\% h_T$: porcentagem de retenção total por volume de leito empacotado (m^3/m^3)

h_D : retenção dinâmica de líquido (m^3)

h_S : retenção estática de líquido (m^3)

V_{EE} : volume Empacotado Especifico (m^3)

A % retenção total do sistema é obtida pela somas das porções estáticas e dinâmicas.

II.9 – A UTILIZAÇÃO DE COLUNAS PILOTO

Colunas piloto apresentam diâmetro interno de pelo menos 50mm, e um diâmetro máximo de até 250mm. É conhecido que a utilização de colunas piloto fornecem as seguintes informações: confirmação dos testes laboratoriais e ou dos cálculos de projeto baseado sobre os dados físicos disponíveis; dados operacionais confiáveis, permitindo deste modo obter dados relativos ao produto que podem ser estabelecidos para as colunas industriais depois que testes piloto tenham sido realizados. Tais garantias referem-se ao grau de pureza, máxima queda de pressão e máxima temperatura da base da coluna. A utilização de colunas piloto podem nos fornecer comportamentos do produto sob condições que são praticamente as mesmas para uma planta de tamanho industrial, tempo de start up (tempo de início) e procedimentos que podem ser transferidos para colunas industriais (Periódico II).

II.10 – CONCLUSÕES PRELIMINARES

Podemos concluir preliminarmente que extensivos estudos relacionados a determinação experimental e predição teórica da retenção de líquido vem sido realizados. Estes estudos concentram-se mais em colunas empacotadas com recheio aleatório e mais recentemente estudos envolvendo recheios estruturados, devido a sua atual crescente utilização dentro das indústrias de processos químicos. Podemos verificar que tais estudos concentram-se em obter a retenção de líquido para o sistema ar-água (chamaremos aqui de sistema padrão), sendo este o sistema mais explorado pelos pesquisadores em todo o mundo. Sendo que, dentro das indústrias de processos nós encontrarmos sistemas que variam grandemente com relação ao sistema padrão, verificamos a necessidade de se obter dados qualitativos e quantitativos para a retenção de líquido em colunas empacotadas com recheios estruturados para sistemas que apresentam propriedades físicas diferentes do sistema padrão (ar-água). É o objetivo deste trabalho, utilizar o sistema padrão para verificar a confiabilidade dos dados experimentais obtidos pela utilização do

método do esgotamento e método volumétrico. Posteriormente é intencionado obter valores qualitativos e quantitativos da retenção de líquido para sistemas que apresentem viscosidade diferentes.

CAPÍTULO III - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

III.1 – OBTENÇÃO DO RECHEIO ESTRUTURADO MELLAPAK 500Y E CONSTRUÇÃO DA COLUNA DE OPERAÇÃO

O início de nosso trabalho se concentrou em obter informações sobre os diversos recheios comerciais existentes junto aos seus fabricantes ou representantes no Brasil, procurando sempre contatar empresas de renome nacional e internacional na sua fabricação. Através de nossos contatos verificamos que a confiabilidade na produção de recheios estruturados é dada a duas empresas internacionais, a Sulzer Brothers Company (Suiça), a qual também é considerada a pioneira na fabricação de tais recheios, e a Norton Chemical (USA), a qual também apresenta grande renome na fabricação de tais materiais. Também foi verificado que somente a Sulzer Brothers, por meio de nosso contato aqui no Brasil, é a única empresa que fabrica recheios com diâmetros que podem ser utilizados em plantas laboratoriais e plantas piloto.

A aquisição do recheio foi realizada por doação da Sulzer Brasil, por intermédio do Sr. Lucimar Menezes (responsável por tal setor no Brasil). Após especificado o diâmetro interno do recheio, pela doação do material, foi realizada a construção da coluna e adaptações necessárias para a realização dos experimentos laboratoriais para a realização desta tese de mestrado.

III.2 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

Nas determinações experimentais das retenções dinâmica e estática de líquido foi utilizada uma coluna de vidro contendo três partes importantes: o corpo da coluna que possui um diâmetro interno de 155mm e uma altura máxima de empacotamento de 1,1m; a base e o topo da coluna conectadas ao corpo utilizando-se juntas esmerilhadas. O topo da coluna é constituído de uma entrada para a fase líquida em seu ponto central, uma saída específica para o fluxo gasoso e uma saída para a realização do acompanhamento da temperatura. A base da coluna é

constituída de uma saída específica para a fase líquida, podendo a mesma estar em um sistema aberto ou fechado pelo manuseio de uma válvula esfera, uma entrada para a fase gasosa, a qual foi dispersa pela utilização de um distribuidor gasoso tipo chuveiro, uma saída para a realização do acompanhamento da temperatura e mais duas saídas laterais que permaneciam fechadas durante a realização dos experimentos. A figura III.1 apresenta um esquema simplificado do equipamento utilizado.

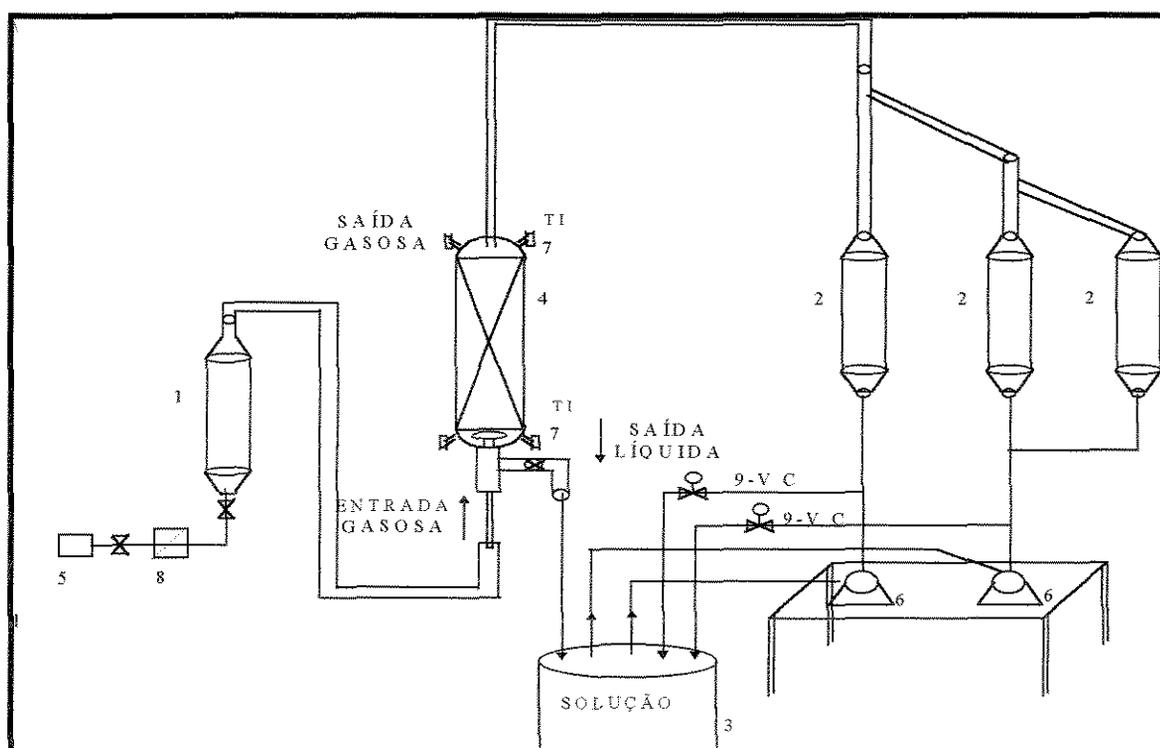


Figura III.1 - Esquema Simplificado do Equipamento

Onde:

1. Rotâmetro Gasoso
2. Rotâmetro Líquido
3. Tanque de Armazenamento da Solução
4. Leito Empacotado
5. Ar Comprimido
6. Bombas de Engrenagem
7. TI: Indicador de Temperatura
8. Filtro de Água
9. VC: By-Pass para Controle do Fluxo Líquido

A coluna foi empacotada com o recheio estruturado Mellapak 500Y, apresentando um diâmetro interno de 150mm. Para o empacotamento total do sistema foram utilizados cinco elementos do recheio Mellapak 500Y, numerados, respectivamente, do topo para a base da coluna, obtendo-se uma altura máxima empacotada de 1,1m. Para a possível realização de tais experimentos, foi necessário durante o decurso desta dissertação que fossem realizadas modificações no sistema e no laboratório para que fosse possível a obtenção de dados representativos referentes a este trabalho.

Inicialmente utilizou-se um leito empacotado com 1,1m e o líquido era introduzido no sistema sem a utilização de um distribuidor para a fase líquida. Foi verificado que para soluções líquidas que apresentavam baixo valor de viscosidade cinemática ocorria um grande efeito de parede, devido à má distribuição líquida inicial referente aos dois primeiros elementos do recheio e que, com viscosidade líquidas altas, o recheio não apresentava boa distribuição líquida até o terceiro elemento de recheio. Portanto, dentro das condições disponíveis foi construído um distribuidor para a fase líquida com o objetivo de minimizar tal efeito no caso dos sistemas estudados.

O sistema primeiramente estudado tinha como fase gasosa o ar e como fase líquida a água. Posteriormente, para se fazer o estudo da variação da viscosidade, foram utilizadas soluções contendo etilenoglicol, propilenoglicol. Todas as medidas foram realizadas à temperatura e pressão ambientes, no estado estacionário e com fluxo em contracorrente. A tabela III.1 apresenta os principais sistemas e propriedades físicas estudadas.

Tabela III.1 - Sistemas e Propriedades Físicas Utilizados

Componente(S)	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade Cinemática (cSt)	Tensão Superficial (dina/cm)
100% água	997,00	0,898	72,11
25% água + 75% etileno glicol (fração volume)	1092,1	6,58	53,64
100% etileno glicol	1113,34	15,12	52,12
19,10% água + 80,90% glicerina (fração molar)		38,5	68,15
5% água + 95% propileno glicol (fração molar)	1035,36	38,5	40,10

O líquido é bombeado até o topo da coluna pela utilização de duas bombas de engrenagem, cada uma com um “by-pass” que permite o controle e o ajuste da vazão de líquido do sistema. A leitura da vazão líquida foi realizada por meio de três rotômetros líquidos, de leitura direta, com calibração do fabricante para a água. Para todas as outras misturas líquidas utilizadas, uma prévia calibração do rotômetro foi realizada, utilizando-se o método volumétrico e confirmando seus resultados algumas vezes, com o método da pesagem. A leitura do fluxo gasoso foi realizada por dois rotômetros gasosos, de leitura direta, com calibração do fabricante para o ar. Na base e no topo da coluna foram instalados dois termômetros para que fosse possível fazer o acompanhamento da temperatura dos sistemas estudados.

O objetivo deste trabalho foi mostrar como as condições operacionais, utilização de um distribuidor para a fase líquida e viscosidade do fluxo líquido podem afetar a formação da retenção de líquido em sistemas gás-líquido.

III.3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Primeiramente, foram feitas as calibrações dos rotâmetros líquidos com os diferentes sistemas e realizadas medidas para se estabelecer o tempo necessário para alcançar o estado estacionário em cada um dos casos.

Após a realização dos procedimentos acima, iniciava-se a operação da coluna, com o objetivo de se obter valores representativos das retenções dinâmica e estática de líquido para os sistemas citados na tabela III.1.

Primeiro foi estudado como as condições operacionais poderiam afetar as retenções dinâmica e estática de líquido, e para isto escolhemos o sistema mais prático e de menor custo possível. Tínhamos como a fase líquida a água destilada e como a fase gasosa o ar comprimido. Era estabelecido um valor para os fluxos gasoso e líquido que circulavam pela coluna, esperava-se o tempo pré-determinado para a obtenção do estado estacionário do sistema e, então, determinava-se a retenção dinâmica de líquido coletando-se o líquido que escoava da coluna, por um período de tempo também pré-determinado, após a interrupção dos fluxos gasoso e líquido do sistema. Posteriormente, mantendo-se o fluxo líquido constante pela coluna, realizavam-se variações no fluxo gasoso para que fosse possível se verificar a influência do fluxo gasoso na formação da retenção dinâmica de líquido. Após realizadas variações no fluxo gasoso até que ele atingisse o seu valor máximo, um segundo valor para o fluxo líquido era estabelecido em um valor novamente constante, diferente do primeiro, para que fosse possível se verificar a influência do fluxo líquido na formação da retenção dinâmica de líquido, e repetia-se todo o procedimento acima até que se atingisse o máximo valor de fluxo líquido possível.

Para se verificar a influência da viscosidade na formação da retenção dinâmica de líquido, utilizou-se do mesmo procedimento acima, dentro das mesmas condições operacionais, mas com soluções líquidas que apresentavam viscosidades diferentes. Foi obtido experimentalmente duas soluções que apresentam mesma

viscosidade, porém com tensões superficiais diferentes. Infelizmente, não houve tempo hábil para que se realizar experimentos com uma destas soluções.

A retenção estática de líquido foi determinada para o sistemas ar-água, dentro das mesmas condições operacionais trabalhadas para os sistemas anteriores, utilizando-se de um aparelho previamente calibrado e realizando-se a leitura da diferença de solução que não retornava da coluna ao reservatório, quando os fluxos gasoso e líquido eram interrompidos.

A verificação da influência da utilização de um distribuidor para a fase líquida na formação da retenção dinâmica de líquido foi realizada através da utilização de alguns dos sistemas citados na tabela III.1, dentro das mesmas condições operacionais trabalhadas pelos sistemas anteriores.

O acompanhamento da temperatura de operação foi realizado através de dois termômetros instalados no topo e na base da coluna. Não foi verificada durante a realização dos experimentos nenhuma variação apreciável de temperatura dos sistemas estudados.

A tabela III.2 apresenta as máximas condições operacionais utilizadas para cada um dos sistemas estudados.

Tabela III.2 – Alcance dos Sistemas Estudados

CARGA LÍQUIDA (M^3/M^2H)	2,82 À 90,54
Vazão Gasosa (m^3/h)	0 à 36
Viscosidade Cinemática (cSt)	0,898 à 38,5
Tensão Superficial (dyne/cm)	40,10 à 72,11

III.4 - OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DAS SOLUÇÕES LÍQUIDAS

III.4.1 – VISCOSIDADE DAS SOLUÇÕES LÍQUIDAS

O obtenção dos dados experimentais para a viscosidade das soluções foram realizadas utilizando-se um viscosímetro do tipo Cannon-Fenske, marca Cannon, de vários modelos conforme a viscosidade da mistura. As determinações foram realizadas em função do tempo de escoamento da mistura, conforme procedimento indicado no catálogo do equipamento. Obtém-se a viscosidade cinemática (ν) da mistura em centistokes pela multiplicação do tempo de escoamento em segundos pela constante do viscosímetro. Todas as medidas foram realizadas com o auxílio de um banho termostático à 25⁰C, com precisão de $\pm 0,1^0$ C.

III.4.2 – DENSIDADE DAS SOLUÇÕES LÍQUIDAS

Para a determinação da densidade das soluções líquidas foram utilizados picnômetros previamente calibrados, conhecendo-se desta forma seu peso e volume. A densidade de cada solução era obtida através da diferença em massa do picnômetro vazio e do picnômetro preenchido pela solução, dividida pelo volume do picnômetro. A pesagem era realizada por uma balança analítica, com precisão de décimos de miligrama.

III.4.3 – TENSÃO SUPERFICIAL DAS SOLUÇÕES LÍQUIDAS

Os dados experimentais foram obtidos utilizando-se o método da Placa de Wilhelmy, no laboratório de Físico-Química (IQ), pelo aluno de pós-graduação Antônio Carlos da Silva Ramos, sob coordenado do professor Dr^o Watson Loh. O equipamento de medida consiste basicamente de uma placa de platina acoplada a uma balança analítica interna. Esta placa é mergulhada e retirada de uma solução

envolta por um banho termostático, sob velocidade controlada. A força dinâmica criada por este processo pode ser medida e o ângulo de contato de avanço e regresso calculado.

III.5 – CONCLUSÕES PRELIMINARES

Nesta parte do trabalho a intenção foi primeiramente, após a aquisição do recheio estruturado, construir, operar e realizar todas as adaptações necessárias no equipamento experimental e no laboratório para se obter dados representativos das retenções dinâmica e estática de líquido. O objetivo principal foi montar o equipamento de tal forma que possibilite a verificação de como as propriedades físicas e a utilização de um distribuidor para a fase líquida podem afetar a formação da retenção de líquido.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas aproximadamente 600 medidas experimentais, sendo que 85% destas medidas são referentes a valores obtidos para as retenções dinâmica e estática, curvas de calibração e para a determinação do estado estacionário do experimento. O restante dos valores experimental (15%), são referentes à obtenção das propriedades físico-químicas dos sistemas estudados. Vale mencionar que o ponto de partida para a obtenção de sistemas com mesmos valores de viscosidade, mas com tensões superficiais diferentes, foi a predição destas propriedades para sistemas com diferentes composições, utilizando-se o simulador comercial ASPEN PLUS, disponível no Laboratório de Desenvolvimento de Processos de Separação (LDPS/DPQ/FEQ), sob coordenação da Prof^a. Dr^a. Maria Regina Wolf Maciel. Vale aqui também ressaltar que toda a parte experimental foi realizada no Laboratório de Separações Físicas (LASEFI/DEA/FEA), cujo um dos coordenadores é o Prof^o. Dr^o. Antônio José de Almeida Meirelles, co-orientador deste trabalho de tese.

IV.1 – CURVAS DE CALIBRAÇÃO

A Figura IV.1 apresenta as curvas de calibração dos rotâmetros para os sistemas estudados nesta tese. As curvas foram obtidas utilizando-se o método volumétrico de leitura. Os dados obtidos experimentalmente apresentaram um coeficiente de variação de 0 à 3%. O coeficiente de variação é calculado pela razão entre o desvio padrão das medidas e seu valor médio e deve-se mencionar que cerca de 50% das medidas obtidas, referentes aos 85% dos dados experimentais, distribuídas homogeneamente pelo conjunto de experimentos realizados, foram feitas em duplicata ou triplicata.

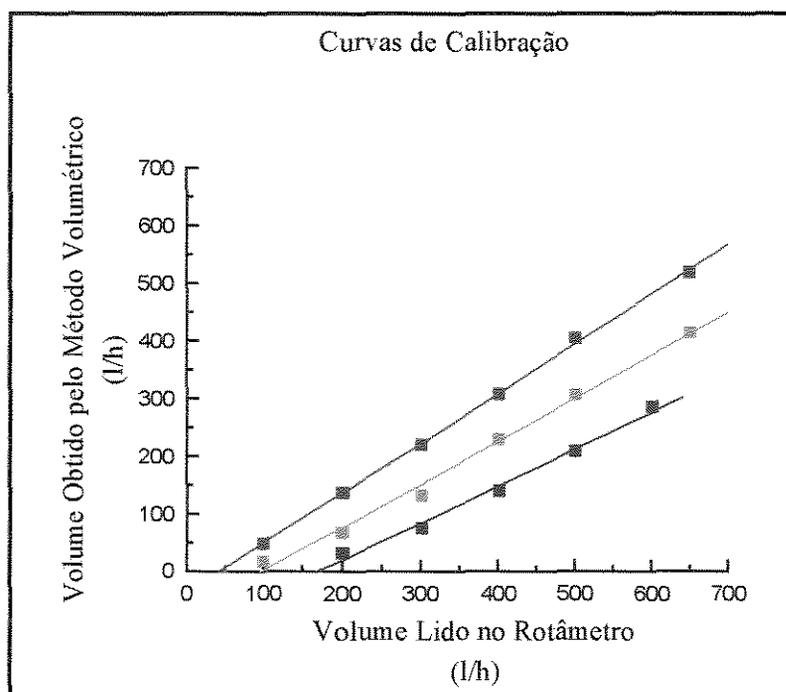


Figura IV.1 – Curvas de Calibração, onde:

- Sistema: Ar - Água - Etilenoglicol
- ▨ Sistema: Ar - Etilenoglicol
- Sistema: Ar - Água - Propilenoglicol

IV.2 – OBTENÇÃO DOS ESTADOS ESTACIONÁRIOS PARA AS SOLUÇÕES LÍQUIDAS

Nas Figuras IV.2 à IV.5 estão representados os estudos obtidos para a determinação do tempo mínimo de drenagem do líquido retido no recheio. Verifica-se que o tempo mínimo necessário para se obter um valor invariável de retenção de líquido foi de 30min para o sistema ar-água (Fig. IV.2) e de 45min para os outros sistemas estudados com soluções que apresentam valores de viscosidades diferentes. A Figura IV.3 representa o sistema ar-água-propilenoglicol dentro desta classe. Como era de se esperar, o aumento da viscosidade da fase líquida elevou este tempo de drenagem. Com relação ao tempo mínimo de circulação, necessário para que o equipamento alcance o estado estacionário, do ponto de vista

hidrodinâmico, obteve-se 15min para o sistema ar-água (Fig. IV.4) e 30min para os outros sistemas, representado aqui pelo sistema ar-água-propilenoglicol (Fig. IV.5).

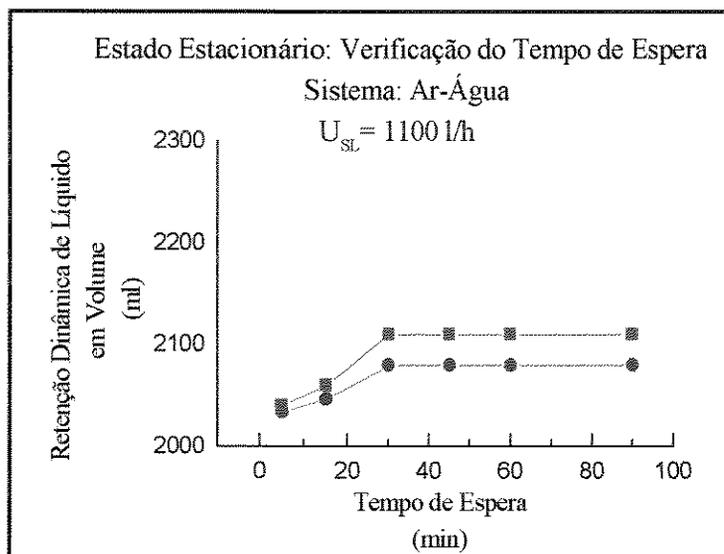


Figura IV.2 – Retenção Dinâmica de Líquido vs Tempo de Espera, onde:
 ■ Tempo de Circulação: 30min: Vazão Gasosa: $0 \text{ m}^3/\text{h}$
 ■ Tempo de Circulação: 30min: Vazão Gasosa: $12 \text{ m}^3/\text{h}$

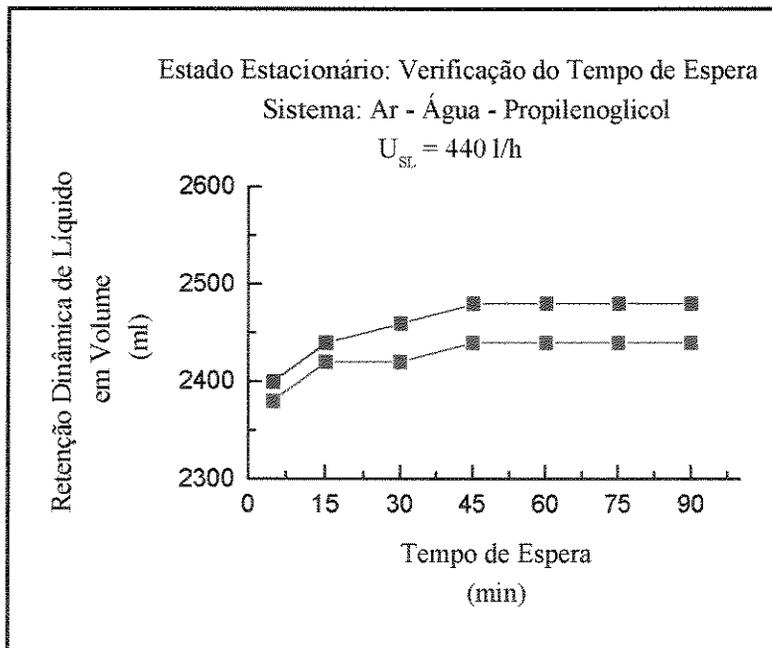


Figura IV.3 – Retenção Dinâmica de Líquido vs Tempo de Espera, onde:
 ■ Tempo de Circulação: 30 min: Vazão Gasosa: $0 \text{ m}^3/\text{h}$
 ■ Tempo de Circulação: 30 min: Vazão Gasosa: $12 \text{ m}^3/\text{h}$

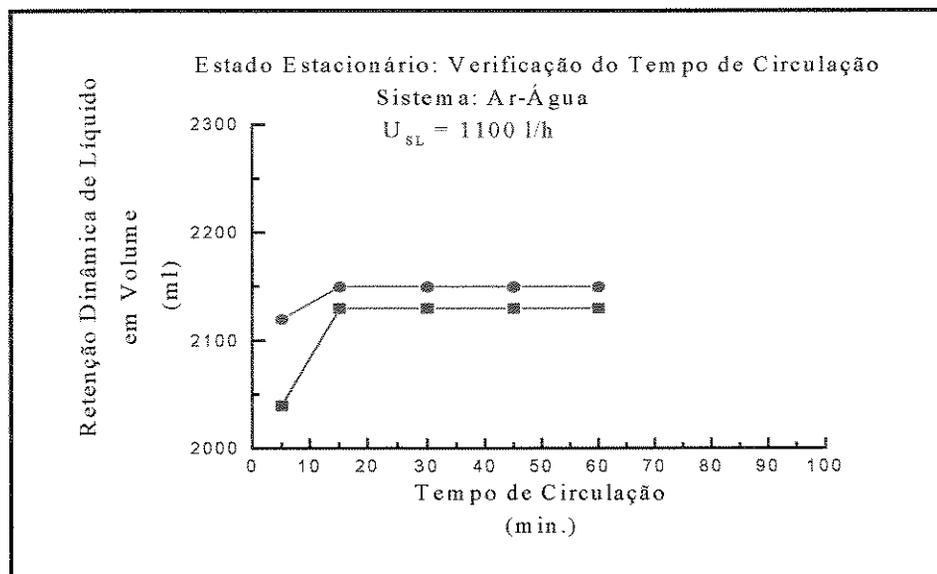


Figura IV.4 – Retenção Dinâmica de Líquido vs Tempo de Circulação, onde:

- Tempo de Espera: 30min: Vazão Gasosa: 0 m³/h
- Tempo de Espera: 30min: Vazão Gasosa: 12 m³/h

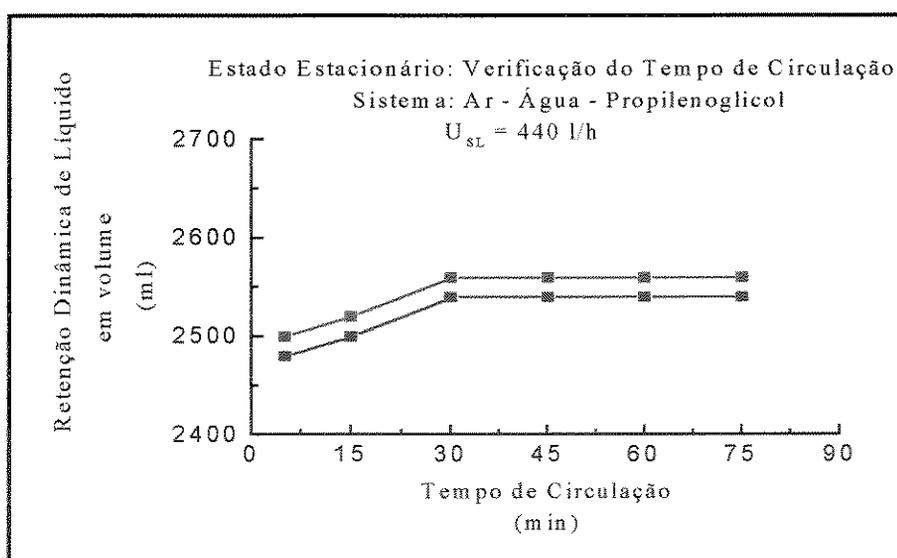


Fig. IV.5 - Retenção Dinâmica de Líquido vs Tempo de Circulação, onde:

- Tempo de Espera: 30 min: Vazão Gasosa: 0 m³/h
- Tempo de Espera: 30 min: Vazão Gasosa: 12 m³/h

Urrutia *et al.* (1996) realizaram experimentos referentes à retenção dinâmica de líquido em colunas empacotadas com recheios aleatórios como uma função do tempo, para o sistema ar-água a diferentes velocidades líquidas superficiais. Os autores observaram que todas as curvas apresentavam a mesma tendência depois

dos 30min de escoamento, vindo ao encontro dos resultados obtidos neste trabalho, pois para o sistema ar-água obteve-se um tempo de drenagem praticamente igual.

Para os demais sistemas estudados, resultados similares foram obtidos e as Figuras correspondentes encontram-se no anexo I.

IV.3 – INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS, DA VISCOSIDADE E DO DISTRIBUIDOR DE LÍQUIDO SOBRE A RETENÇÃO DINÂMICA DE LÍQUIDO.

Primeiramente será mostrado como as condições operacionais podem afetar a retenção dinâmica de líquido sem ou com a utilização de um distribuidor para a fase líquida. Para isto serão apresentados os resultados típicos observados. O restante das figuras, representando os sistemas que não são apresentados aqui, encontram-se no anexo I. Vale mencionar novamente, que a maioria dos dados disponíveis na literatura sobre as retenções total, dinâmica e estática são referentes ao sistema ar-água e que somente foi encontrado um estudo qualitativo da influência da viscosidade sobre a formação da retenção total de líquido, tendo sido realizado por Suess e Spiegel em 1992. Posteriormente, será apresentado o efeito da utilização de um distribuidor para a fase líquida e como a variação das propriedades físico-químicas da fase líquida pode afetar a retenção de líquido em colunas empacotadas.

IV.3.1 – INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS

As Figuras IV.6 a IV.10 e as tabelas IV.1 a IV.5 apresentam a retenção dinâmica de líquido como uma função do fator-F, tendo a carga líquida como parâmetro, a qual foi variada entre 2,82 à 90,54 m³/m²h.

Observando-se as figuras IV.6 e IV.7, verifica-se que na faixa de fluxos líquido e gasoso estudados, a retenção dinâmica de líquido é praticamente independente do fluxo gasoso e aumenta com o aumento do fluxo líquido, comportamento que é o normalmente esperado. Portanto, os resultados obtidos nas Figuras. IV.6 e IV.7, permitem concluir que o equipamento experimental utilizado e toda a metodologia experimental empregada fornecem dados representativos quando comparados com os perfis para a retenção de líquido encontrados na literatura.

Tabela IV.1 – Retenção Dinâmica de Líquido: Sistema: Ar – Água (sem distribuidor para a fase líquida)

A_{ST} (m^2)	V_{EE} (m^3)	ρ_G (kg/m^3)	V_L (l/h)	Q_G (m^3/h)	u_G (m/s)	F-factor ($m/s(kg/m^3)^{0,5}$)	C_L (m^3/m^2h)	h_D (ml)	$\%h_D$ (m^3/m^3)
0,017672	0,01895	1,178	50	0	0	0	2,82	300	1,58
				1	0,0157	0,017		301	1,58
				6	0,0943	0,1023		305	1,60
				10	0,1571	0,1706		308	1,62
				12	0,1886	0,2047		315	1,66
0,017672	0,01895	1,178	100	0	0	0	5,65	380	2,00
				6	0,0943	0,1023		380	2,00
				10	0,1571	0,1706		410	2,16
				12	0,1886	0,2047		410	2,16
0,017672	0,01895	1,178	170	0	0	0	9,62	475	2,50
				6	0,0943	0,1023		488	2,57
				12	0,1886	0,2047		490	2,58
0,017672	0,01895	1,178	250	0	0	0	14,14	600	3,16
				6	0,0943	0,1023		630	3,32
				12	0,1886	0,2047		635	3,35
0,017672	0,01895	1,178	400	0	0	0	22,63	770	4,06
				3	0,0471	0,0511		790	4,16
				6	0,0943	0,1023		798	4,21
				9	0,1414	0,1535		810	4,27
				12	0,1886	0,2047		818	4,31
				18	0,2829	0,3070		840	4,43

Continuação da Tabela IV.1:

A_{ST} (m^2)	V_{EE} (m^3)	ρ_G (kg/m^3)	V_L (l/h)	Q_G (m^3/h)	u_G (m/s)	F-factor ($m/s(kg/m^3)^{0,5}$)	C_L (m^3/m^2h)	h_D (ml)	$\%h_D$ (m^3/m^3)
0,017672	0,01895	1,178	800	0	0	0	45,27	1260	6,64
				3	0,0471	0,0511		1280	6,75
				6	0,0943	0,1023		1305	6,88
				9	0,1414	0,1535		1315	6,93
				12	0,1886	0,2047		1320	6,96
				18	0,2829	0,3070		1330	7,01
0,017672	0,01895	1,178	1200	0	0	0	67,90	1840	9,70
				3	0,0471	0,0511		1840	9,70
				6	0,0943	0,1023		1860	9,81
				9	0,1414	0,1535		1880	9,91
				12	0,1886	0,2047		1900	10,02
				18	0,2829	0,3070		1910	10,07
0,017672	0,01895	1,178	1600	0	0	0	90,54	2340	12,34
				3	0,0471	0,0511		2380	12,55
				6	0,0943	0,1023		2390	12,61
				9	0,1414	0,1535		2450	12,92
				12	0,1886	0,2047		2460	12,97
				18	0,2829	0,3070		2470	13,02

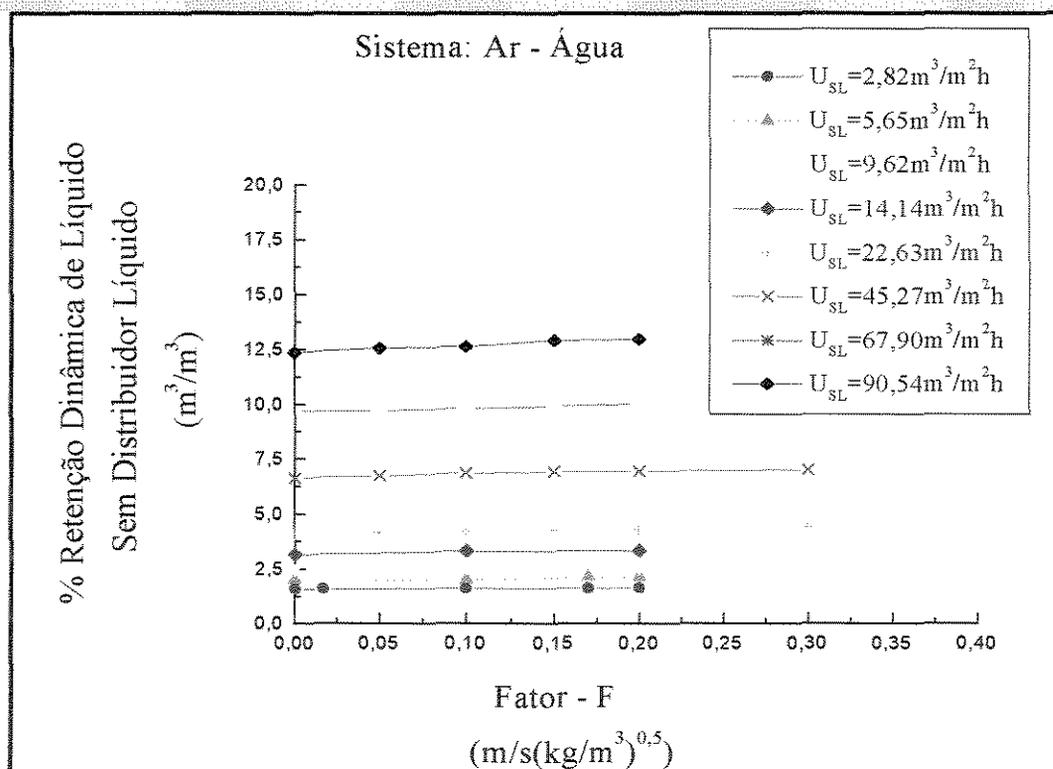


Figura IV.6 - % Retenção Dinâmica de Líquido vs Fator-F

Tabela IV.2 - Retenção Dinâmica de Líquido: Sistema: Ar – Água (com distribuidor para fase líquida).

A_{ST} (m^2)	V_{EE} (m^3)	d_G (kg/m^3)	V_L (l/h)	Q_G (m^3/h)	v_G (m/s)	F-factor ($m/s(kg/m^3)^{0,5}$)	C_L (m^3/m^2h)	h_D (ml)	% h_D (m^3/m^3)
0,017672	0,01895	1,178	400	0	0	0	22,63	1200	6,33
				3	0,0471	0,0511		1220	6,43
				6	0,0943	0,1023		1230	6,48
				9	0,1414	0,1535		1240	6,54
				12	0,1886	0,2047		1240	6,54
				18	0,2829	0,3070		1240	6,54
				24	0,3772	0,4094		1240	6,54
0,01895	1,178		440	0	0	0	25	1320	6,96
				3	0,0471	0,0511		1320	6,96
				6	0,0943	0,1023		1320	6,96
				9	0,1414	0,1535		1350	7,12
				12	0,1886	0,2047		1350	7,12
				18	0,2829	0,3070		1350	7,12
				24	0,3772	0,4094		1370	7,22
0,017672	0,01895	1,178	800	0	0	0	45,27	1780	9,39
				3	0,0471	0,0511		1780	9,39
				6	0,0943	0,1023		1800	9,49
				9	0,1414	0,1535		1800	9,49
				12	0,1886	0,2047		1800	9,49
				18	0,2829	0,3070		1800	9,49
				24	0,3772	0,4094		1800	9,49
0,017672	0,01895	1,178	1200	0	0	0	67,90	2400	12,66
				3	0,0471	0,0511		2400	12,66
				6	0,0943	0,1023		2420	12,76
				9	0,1414	0,1535		2420	12,76
				12	0,1886	0,2047		2420	12,76
				18	0,2829	0,3070		2450	12,92
				24	0,3772	0,4094		2450	12,92
				30	0,4715	0,5118	2460	12,97	

Continuação da Tabela IV.2:

A_{ST} (m^2)	V_{EE} (m^3)	d_G (kg/m^3)	V_L (l/h)	Q_G (m^3/h)	v_G (m/s)	F-factor ($m/s(kg/m^3)^{0,5}$)	C_L (m^3/m^2h)	h_D (ml)	$\%h_D$ (m^3/m^3)
0,017672	0,01895	1,178	1600	0	0	0	90,54	2860	15,09
				3	0,0471	0,0511	2860	15,09	
				6	0,0943	0,1023	2880	15,19	
				9	0,1414	0,1535	2880	15,19	
				12	0,1886	0,2047	2880	15,19	
				18	0,2829	0,3070	2880	15,19	
				24	0,3772	0,4094	2920	15,40	
				30	0,4715	0,5118	2920	15,40	

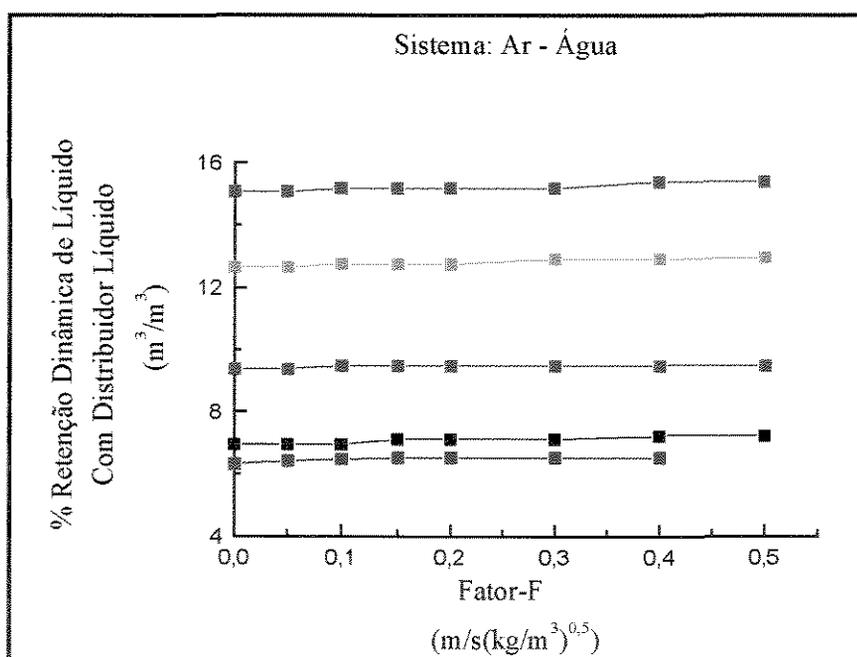


Figura IV.7 - % Retenção Dinâmica de Líquido vs Fator-F, onde:

- $U_{SL} = 22,63 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- $U_{SL} = 25,00 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- $U_{SL} = 45,27 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- $U_{SL} = 67,90 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- $U_{SL} = 90,54 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$

Nas Figuras IV.8 e IV.9 pode ser verificado que a influência do fluxo gasoso torna-se um pouco mais acentuada com o aumento da vazão de líquido e com o aumento da viscosidade. A utilização do recheio Mellapak 500Y dentro dos processos comerciais, ou seja, nas indústrias químicas e petroquímicas, é

especialmente indicada para processos que apresentam viscosidades líquidas de até 3cP e para cargas líquidas não muito baixas. É relatado pelo fabricante, que este recheio, normalmente não apresenta uma distribuição líquida tão boa quando se utilizam sistemas que apresentam viscosidades líquidas altas e baixas cargas líquidas. Portanto, uma certa influência do fluxo gasoso notado em tais sistemas quando este entra em contato, em contracorrente, com a fase líquida deve-se ao fato deste fluxo gasoso poder causar uma pequena melhora na distribuição radial de líquido no sistema, aumentando assim a retenção dinâmica de líquido. Tal suposição pode ser reforçada na Figura IV.10, que apresenta a retenção dinâmica de líquido como função do fator-F, para o sistema ar-água-propilenoglicol, com a utilização de um distribuidor para a fase líquida. Pode-se verificar que os dados obtidos com a utilização de um distribuidor líquido, para as mesmas condições operacionais, não apresentam mais a influência do fluxo gasoso na retenção dinâmica de líquido observada anteriormente. Verifica-se novamente que a influência da carga líquida sobre a retenção dinâmica de líquido mantém o mesmo comportamento, ou seja, o aumento da carga líquida aumenta consideravelmente a retenção dinâmica de líquido no sistema.

**Tabela IV.3 – Retenção Dinâmica de Líquido: Sistema: Ar – Água – Etilenoglicol
(sem distribuidor para a fase líquida).**

A_{ST} (m^2)	V_{EE} (m^3)	d_G (kg/m^3)	V_L (l/h)	Q_G (m^3/h)	u_G (m/s)	F-factor ($m/s(kg/m^3)^{0.5}$)	C_L (m^3/m^2h)	h_D (ml)	$\%h_D$ (m^3/m^3)
0,017672	0,01895	1,178	119,16	0	0	0	6,74	440	2,32
				3	0,0471	0,0511		440	2,32
				6	0,0943	0,1023		460	2,42
				9	0,1414	0,1535		480	2,53
				12	0,1886	0,2047		515	2,71
0,017672	0,01895	1,178	185	0	0	0	10,49	550	2,90
				3	0,0471	0,0511		580	3,06
				6	0,0943	0,1023		610	3,21
				9	0,1414	0,1535		640	3,37
				12	0,1886	0,2047		670	3,53

Continuação da Tabela IV.3:

A_{ST} (m^2)	V_{EE} (m^3)	d_G (kg/m^3)	V_L (l/h)	Q_G (m^3/h)	u_G (m/s)	F-factor ($m/s(kg/m^3)^{0,5}$)	C_L (m^3/m^2h)	h_D (ml)	$\%h_D$ (m^3/m^3)
0,017672	0,01895	1,178	440	0	0	0	25	1130	5,96
				3	0,0471	0,0511		1160	6,12
				6	0,0943	0,1023		1180	6,22
				9	0,1414	0,1535		1210	6,38
				12	0,1886	0,2047		1270	6,70
0,017672	0,01895	1,178	1200	0	0	0	67,90	2580	13,61
				3	0,0471	0,0511		2660	14,03
				6	0,0943	0,1023		2770	14,61
				9	0,1414	0,1535		2880	15,19
				12	0,1886	0,2047		2940	15,51

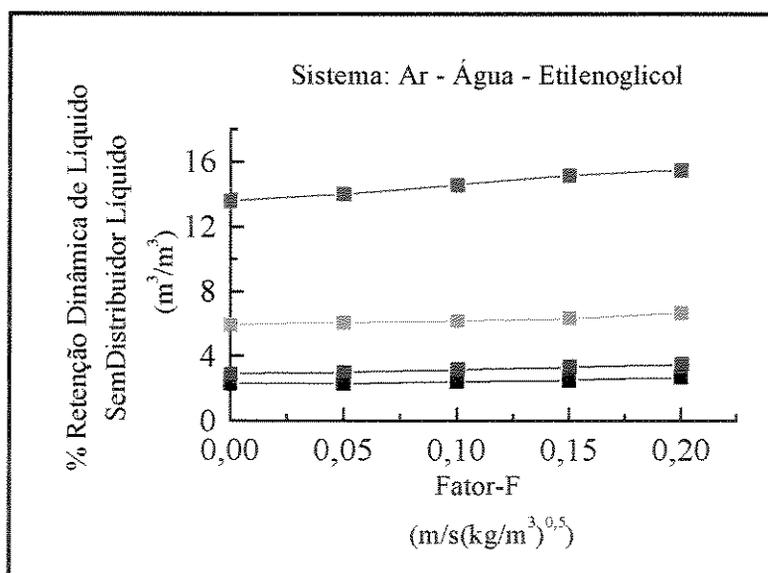


Figura IV.8 - % Retenção Dinâmica de Líquido vs fator-F, onde:

- $U_{SL} = 6,740 m^3/m^2h$
- $U_{SL} = 10,49 m^3/m^2h$
- $U_{SL} = 25,00 m^3/m^2h$
- $U_{SL} = 67,90 m^3/m^2h$

**Tabela IV.4 – Retenção Dinâmica de Líquido: Sistema: Ar – Água – Propilenoglicol
(sem distribuidor para a fase líquida).**

A_{ST} (m^2)	V_{EE} (m^3)	d_G (kg/m^3)	V_L (l/h)	Q_G (m^3/h)	v_G (m/s)	F-factor ($m/s(kg/m^3)^{0,5}$)	C_L (m^3/m^2h)	h_D (ml)	$\%h_D$ (m^3/m^3)
0,017672	0,01895	1,178	185	0	0	0	10,49	1700	8,96
				3	0,0471	0,0511		1740	9,18
				6	0,0943	0,1023		1850	9,76
				9	0,1414	0,1535		1880	9,91
				12	0,1886	0,2047		2000	10,55
0,017672	0,01895	1,178	440	0	0	0	25	2300	12,13
				3	0,0471	0,0511		2360	12,45
				6	0,0943	0,1023		2460	12,97
				9	0,1414	0,1535		2540	13,40
				12	0,1886	0,2047		2540	13,40
0,017672	0,01895	1,178	670	0	0	0	37,91	3060	16,14
				3	0,0471	0,0511		3080	16,25
				6	0,0943	0,1023		3180	16,77
				9	0,1414	0,1535		3230	17,04
				12	0,1886	0,2047		3280	17,40
0,017672	0,01895	1,178	700	0	0	0	39,61	3400	17,93
				3	0,0471	0,0511		3420	18,04
				6	0,0943	0,1023		3480	18,36
				9	0,1414	0,1535		3510	18,51
				12	0,1886	0,2047		3570	18,83

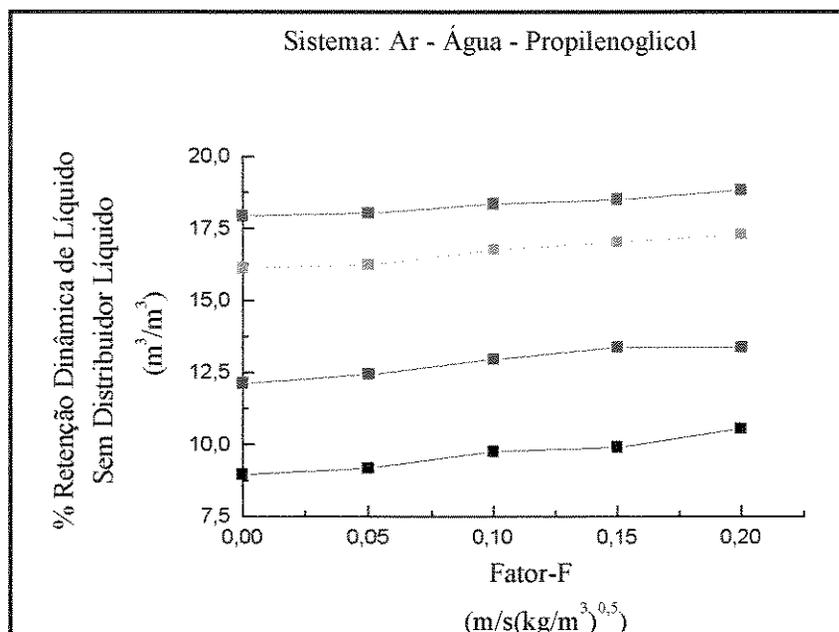


Figura IV.9 - % Retenção Dinâmica de Líquido vs Fator-F, onde:

- U_{SL} = 10,46 m³/m²h
- U_{SL} = 25,00 m³/m²h
- U_{SL} = 37,91 m³/m²h
- U_{SL} = 39,61 m³/m²h

Tabela IV.5 – Retenção Dinâmica de líquido: Sistema: Ar – Água – Propilenoglicol, (com distribuidor para a fase líquida).

A _{ST} (m²)	V _{EE} (m³)	d _G (kg/m³)	V _L (l/h)	Q _G (m³/h)	v _G (m/s)	F-factor (m/s(kg/m³) ^{0,5})	C _L (m³/m²h)	h _D (ml)	%h _D (m³/m³)
0,017672	0,01895	1,178	440	0	0	0	25	2500	13,19
				3	0,0471	0,0511		2500	13,19
				6	0,0943	0,1023		2500	13,19
				9	0,1414	0,1535		2500	13,19
				12	0,1886	0,2047		2500	13,19
				18	0,2829	0,3070		2500	13,19
				24	0,3772	0,4094		2520	13,29
				30	0,4715	0,5118		2540	13,40
0,017672	0,01895	1,178	670	0	0	0	37,91	3220	16,98
				3	0,0471	0,0511		3220	16,98
				6	0,0943	0,1023		3220	16,98
				9	0,1414	0,1535		3220	16,98
				12	0,1886	0,2047		3220	16,98
				18	0,2829	0,3070		3240	17,09
				24	0,3772	0,4094		3280	17,30
				30	0,4715	0,5118		3280	17,30

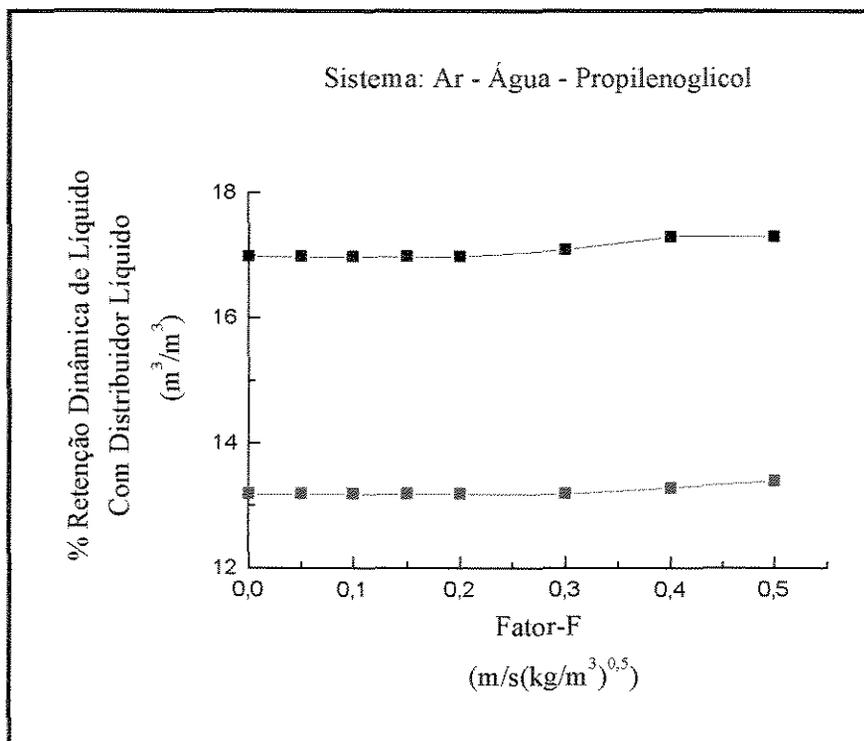


Figura IV.10 - % Retenção Dinâmica de Líquido vs Fator-F, onde:

- $U_{SL} = 25 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- $U_{SL} = 37,91 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$

A maioria dos dados experimentais obtidos apresentam um coeficiente de variação em torno de 0% à 3,40%. Somente uma porção mínima dos dados obtidos apresentaram um coeficiente de variação superior, no máximo de 7%.

IV.3.2 – INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE UM DISTRIBUIDOR PARA A FASE LÍQUIDA

As Figuras IV.11 a IV.13 apresentam a influência da presença de um distribuidor para a fase líquida sobre a retenção dinâmica de líquido. Como pode-se observar, para o sistema ar-água, um sistema de baixa viscosidade, a presença do distribuidor tem um efeito bastante significativo. Deve-se comparar os resultados obtidos com e sem distribuidor para as vazões de líquido de 45,27 e 67,90 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$

(Fig. IV.11), respectivamente, ou, então, $67,90$ e $90,54 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (Fig. IV.11), também com e sem distribuidor, respectivamente. Nestes casos, a presença do distribuidor dá origem a valores muito próximos de retenção, apesar das diferenças de vazões de líquido. Por outro lado, comparando-se resultados obtidos com a mesma vazão de líquido, observa-se que a presença do distribuidor elevou em cerca de 30% a retenção dinâmica de líquido.

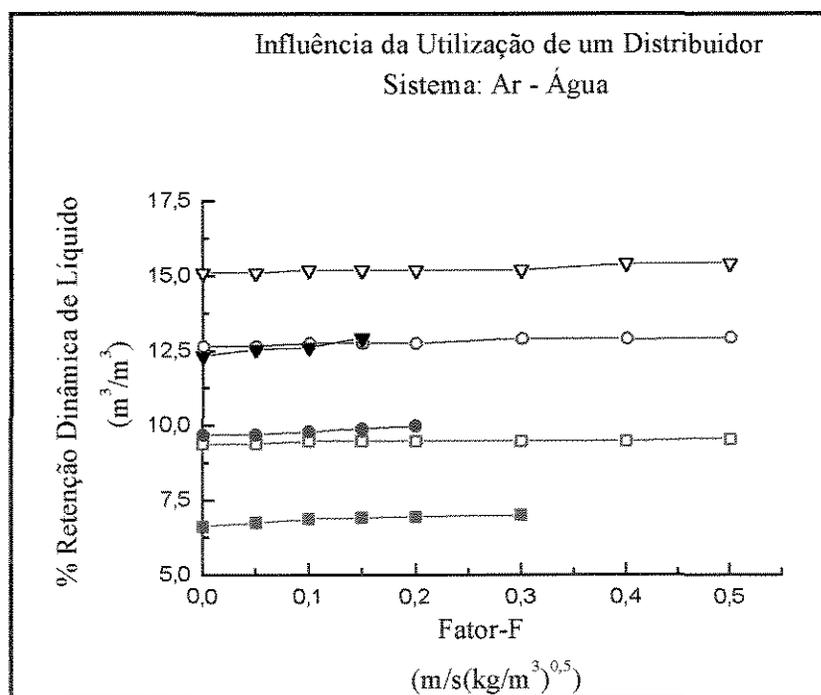


Figura IV.11 - % Retenção Dinâmica de Líquido vs Fator-F, onde:

- $U_{SL} = 45,27 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Sem Distribuidor
- $U_{SL} = 45,27 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Com Distribuidor
- $U_{SL} = 67,90 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Sem Distribuidor
- $U_{SL} = 67,90 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Com Distribuidor
- ▼ $U_{SL} = 90,54 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Sem Distribuidor
- ▽ $U_{SL} = 90,54 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Com Distribuidor

No entanto este efeito tão pronunciado não é observado nos sistemas que apresentam altas viscosidade da fase líquida (Figs. IV.12 e IV.13). Ainda assim, pode-se observar que a presença do distribuidor diminui o efeito da vazão do gás sobre a retenção dinâmica de líquido. Este efeito, observado na ausência de distribuidor para baixos valores do fator-F, indica que o aumento da vazão de gás desempenha um papel similar à utilização de um distribuidor, aumentando assim a retenção dinâmica de líquido. Informações comerciais de firmas que constroem

recheios estruturados sugerem que para equipamentos que apresentam diâmetros pequenos, menor do que 300mm (como os encontrados em colunas piloto), a utilização de distribuidor para a fase líquida não apresenta grande importância, pelo fato de o próprio recheio realizar uma boa distribuição em tais equipamentos. Pode-se verificar que os nossos dados sugerem, ao contrário, que pelo menos para sistemas de baixas viscosidade é importante a utilização de um distribuidor, mesmo para equipamentos com pequeno diâmetro.

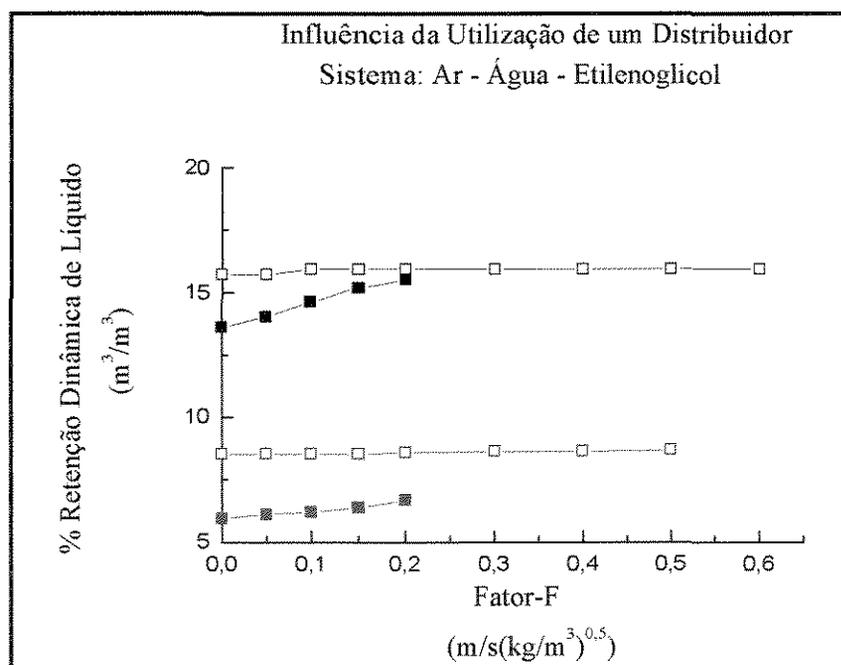


Figura IV.12 - % Retenção Dinâmica de Líquido vs Fator-F, onde:

- $U_{SL} = 25,00 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Sem Distribuidor
- $U_{SL} = 25,00 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Com Distribuidor
- $U_{SL} = 67,90 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Sem Distribuidor
- $U_{SL} = 67,90 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Com Distribuidor

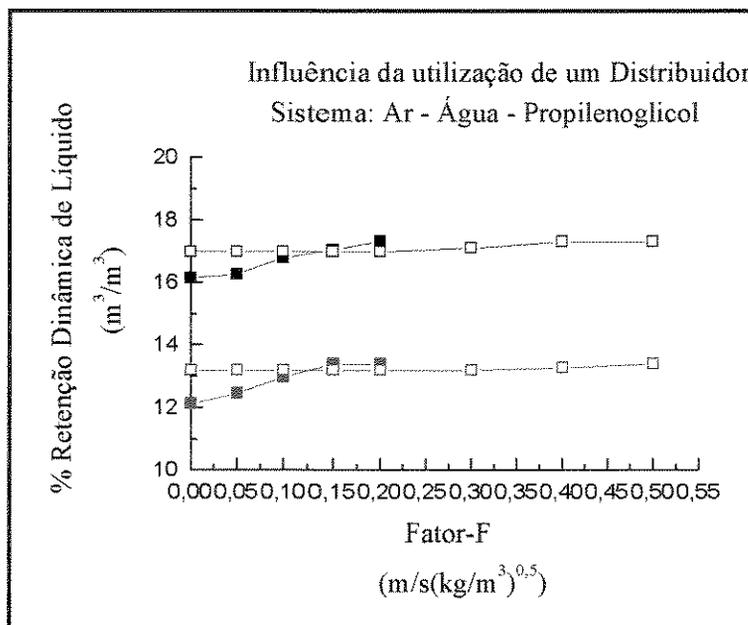


Figura IV.13 - % Retenção Dinâmica de Líquido vs Fator-F, onde:

- U_{SL} = 25,00 m³/m²h - Sem Distribuidor
- U_{SL} = 25,00 m³/m²h - Com Distribuidor
- U_{SL} = 37,91 m³/m²h - Sem Distribuidor
- U_{SL} = 37,91 m³/m²h - Com Distribuidor

IV.3.3 – INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE

As Figuras IV.14 e IV.15 apresentam a retenção dinâmica de líquido como uma função do fator-F, tendo como parâmetro a carga líquida para diferentes viscosidades desta fase. Pode-se verificar que o aumento da viscosidade do sistema apresenta uma forte influência no aumento da retenção dinâmica de líquido. Este fato é justificado teoricamente por diversos pesquisadores, mencionado anteriormente no capítulo II, ítem II.7, no qual são apresentadas as equações teóricas existentes na literatura para a predição da retenção de líquido em colunas empacotadas, sendo freqüentemente admitido por eles que o fluxo de líquido descendente em uma coluna empacotada apresenta escoamento tipo laminar, pelo menos em trechos do equipamento. Como se sabe, neste tipo de escoamento a espessura do filme líquido descendente é diretamente dependente da viscosidade do líquido e de sua vazão. Pode-se também perceber aqui o pequeno efeito da

vazão de gás (Fig. IV.14), o qual se torna um pouco mais acentuado para sistemas com maiores viscosidade e maiores cargas líquidas, sobre a retenção dinâmica de líquido.

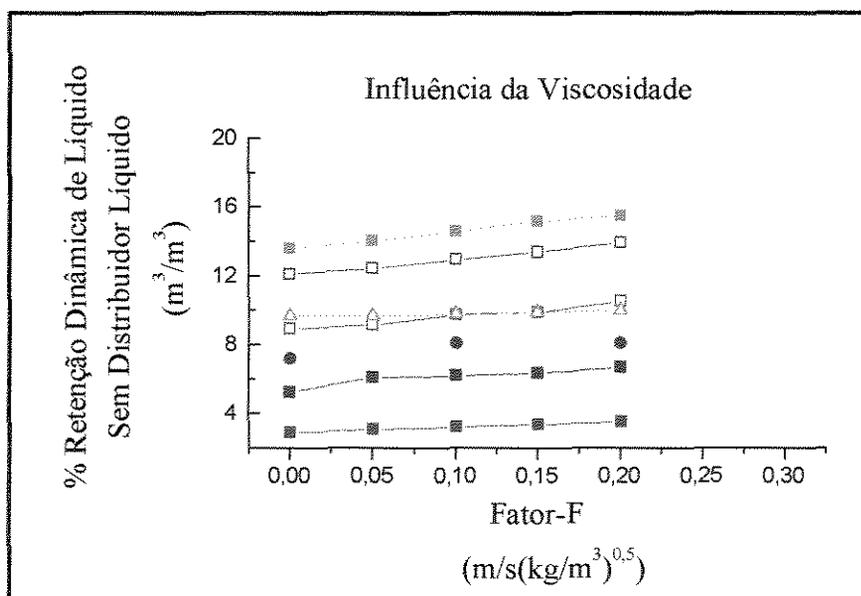


Figura IV.14 - % Retenção Dinâmica de Líquido vs Fator-F, onde:

- $U_{SL} = 10,50 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - Etilenoglicol - 6,58 cSt
- $U_{SL} = 10,50 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - Propilenoglicol - 38,5
- ▤ $U_{SL} = 25,00 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - Etilenoglicol - 6,58 cSt
- $U_{SL} = 25,00 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Etilenoglicol - 15,12 cSt
- ▥ $U_{SL} = 25,00 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - Propilenoglicol - 38,5 cSt
- △ $U_{SL} = 67,90 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - 0,898 cSt
- ▧ $U_{SL} = 67,90 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - Etilenoglicol - 6,58 cSt

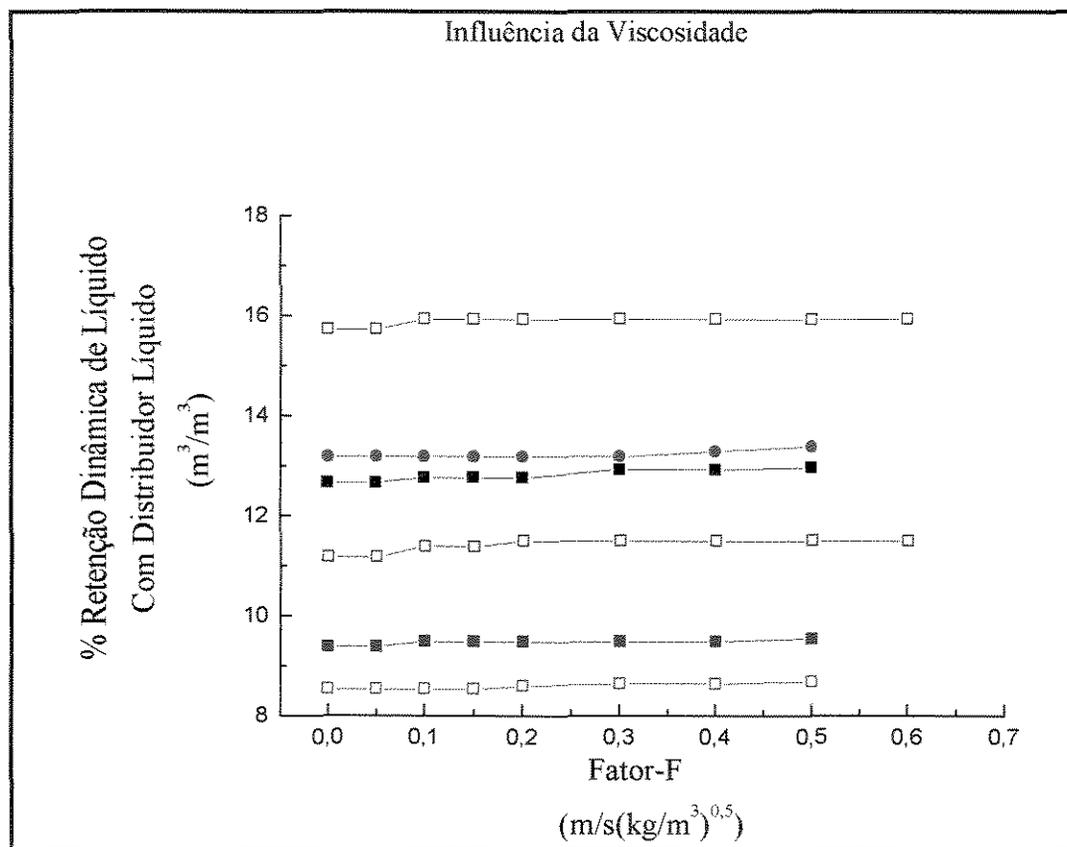


Figura IV.15 - % Retenção Dinâmica de Líquido vs Fator-F, onde:

- $U_{SL} = 25,00 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - 0,898 cSt
- $U_{SL} = 25,00 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - Etilenoglicol - 6,58 cSt
- $U_{SL} = 25,00 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - Propilenoglicol - 38,5 cSt
- $U_{SL} = 45,27 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - 0,898 cSt
- $U_{SL} = 45,27 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - Etilenoglicol - 6,58 cSt
- $U_{SL} = 67,90 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - 0,898 cSt
- $U_{SL} = 67,90 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ - Ar - Água - Etilenoglicol - 6,58 cSt

IV.4 – INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS NA FORMAÇÃO DA RETENÇÃO ESTÁTICA DE LÍQUIDO

Como foi verificado no capítulo II, a forma de como as condições operacionais podem afetar a retenção estática de líquido em colunas empacotadas, ainda gera algumas contradições. Até metade da década de oitenta, acreditava-se que a retenção estática de líquido era independente das taxas de fluxo líquido e gasoso. Deve ser ressaltado aqui que tais dados eram obtidos através de extrapolações dos gráficos que apresentavam a retenção total de líquido versus o

fator-F ou utilizando-se o método de pré-molhamento do recheio, situação esta muito improvável em aplicações industriais. Portanto, é conhecido que com a utilização de tais técnicas e através de toda a discussão realizada no capítulo II, é obvio que se obtenha um valor único e constante para a retenção estática de líquido.

Devido à improbabilidade de se pré-molhar o recheio antes de se iniciar uma operação industrial, Kushalkar e Pangarkar (1992) realizaram experimentos de retenção estática de líquido em função da carga líquida, sem realizar um pré-molhamento da superfície do recheio e trabalhando com fluxo gasoso nulo, já que os autores admitem, que o fluxo gasoso não apresenta nenhuma influência na formação de líquido até o ponto de carga da coluna. Seus dados demonstram um claro aumento da retenção estática de líquido com o aumento da carga líquida dos sistemas e que quando trabalha-se com altas cargas líquidas, o valor da retenção estática tende a um valor constante.

Devido a estas discordâncias, os experimentos deste trabalho de tese para obtenção da retenção estática de líquido foram feitos sem a realização do pré-molhamento da superfície do recheio, mas não utilizando-se a pressuposição de não influência do fluxo gasoso. Os dados obtidos, representados pelas figuras IV.16 e IV.17, mostram que a retenção estática de líquido apresenta um razoável aumento com a carga líquida dos sistemas, tendendo a um valor constante a altas cargas líquidas. Isto é devido ao fato de que com o aumento da carga líquida do sistema, uma maior superfície do recheio é alcançada pelo fluxo líquido, provavelmente pelo espalhamento radial de líquido. Consequentemente, a retenção estática de líquido, a qual é dependente da superfície molhada, deve aumentar com a carga líquida.

Não foi encontrado na literatura, como o fluxo gasoso poderia afetar a formação estática de líquido. É encontrado este efeito somente sobre os dados referentes às retenções total e dinâmica de líquido. É comum se admitir que a

influência do fluxo gasoso seja desprezível até que seja atingido o ponto de carga da coluna, onde tal suposição não poderia ser mais válida. Ao se comparar a faixa de fluxo gasoso utilizada nesta tese com relação às faixas encontradas na literatura, verifica-se que se está trabalhando bem aquém dos valores encontrados. Porém, pode-se verificar, através da Figura IV.17, que dentro da faixa de fluxo gasoso utilizada, a retenção estática de líquido é praticamente independente do fluxo gasoso até um certo limite, a partir do qual a retenção estática sofre uma certa influência deste parâmetro. Pode ser que a retenção estática se torne novamente independente do fluxo gasoso após esta faixa. Para que seja possível se afirmar tal efeito, seria necessário realizar experimentos a vazões gasosas mais elevadas. Infelizmente, no momento, já se está trabalhando no limite máximo possível do arranjo experimental disponível.

Tabela IV.6 – Retenção Estática de Líquido: Sistema: Ar – Água, (com distribuidor para fase líquida).

A_{ST} (m^2)	V_{EE} (m^3)	d_G (kg/m^3)	V_L (l/h)	Q_G (m^3/h)	v_G (m/s)	F-factor ($m/s(kg/m^3)^{0.5}$)	C_L (m^3/m^2h)	h_E (ml)	% h_E (m^3/m^3)
0,017672	0,01895	1,178	440	0	0	0	25	540	2,84
				3	0,0471	0,0511		540	2,84
				6	0,0943	0,1023		560	2,95
				9	0,1414	0,1535		560	2,95
				12	0,1886	0,2047		560	2,95
				18	0,2829	0,3070		570	3,00
0,017672	0,01895	1,178	600	0	0	0	33,95	630	3,32
				3	0,0471	0,0511		630	3,32
				6	0,0943	0,1023		630	3,32
				9	0,1414	0,1535		650	3,42
				12	0,1886	0,2047		670	3,53
				18	0,2829	0,3070		730	3,85
				24	0,3772	0,4094		760	4,00

Continuação da Tabela IV.6:

A_{ST} (m^2)	V_{EE} (m^3)	d_G (kg/m^3)	V_L (l/h)	Q_G (m^3/h)	v_G (m/s)	F-factor ($m/s(kg/m^3)^{0.5}$)	C_L (m^3/m^2h)	h_E (m)	$\%h_E$ (m^3/m^3)
0,017672	0,01895	1,178	800	0	0	0	45,27	870	4,59
				3	0,0471	0,0511		870	4,59
				6	0,0943	0,1023		870	4,59
				9	0,1414	0,1535		870	4,59
				12	0,1886	0,2047		870	4,59
				18	0,2829	0,3070		1010	5,32
				24	0,3772	0,4094		1130	5,96
0,017672	0,01895	1,178	1200	0	0	0	33,95	950	5,01
				3	0,0471	0,0511		950	5,01
				6	0,0943	0,1023		960	5,06
				9	0,1414	0,1535		960	5,06
				12	0,1886	0,2047		100	5,27
				18	0,2829	0,3070		1070	5,64
				24	0,3772	0,4094		1230	6,48

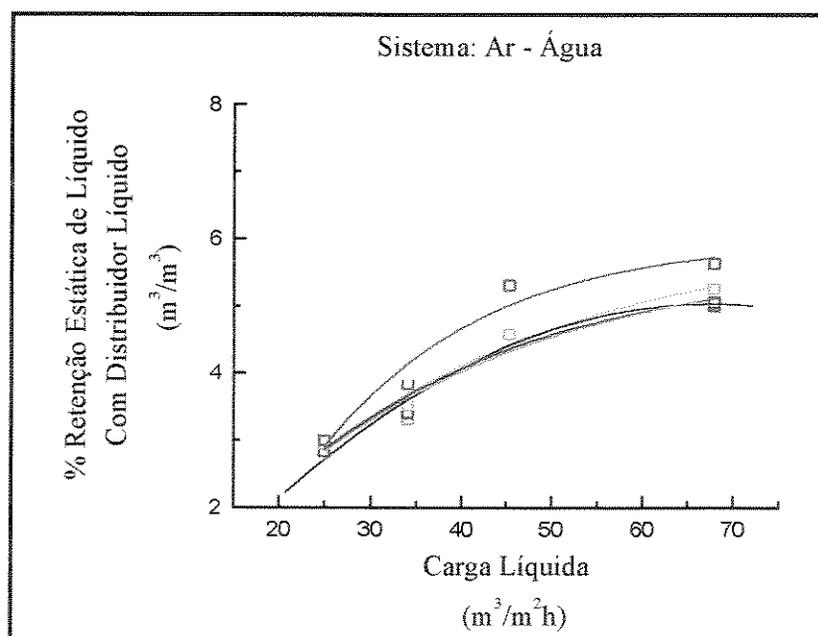


Figura IV.16 - % Retenção Estática de Líquido vs Carga Líquida, onde:

- Fator-F = 0,00 $m/s (kg/m^3)^{0.5}$
- Fator-F = 0,05 $m/s (kg/m^3)^{0.5}$
- Fator-F = 0,10 $m/s (kg/m^3)^{0.5}$
- Fator-F = 0,15 $m/s (kg/m^3)^{0.5}$
- Fator-F = 0,20 $m/s (kg/m^3)^{0.5}$
- Fator-F = 0,30 $m/s (kg/m^3)^{0.5}$
- Fator-F = 0,40 $m/s (kg/m^3)^{0.5}$

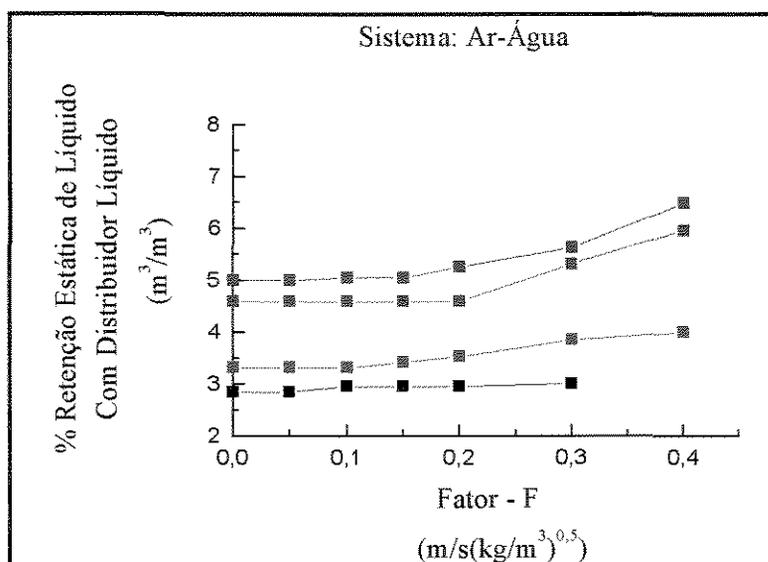


Figura IV.17 - % Retenção Estática de Líquido vs Fator-F, onde:

- U_{SL} = 25,00 m³/m²h
- U_{SL} = 33,95 m³/m²h
- U_{SL} = 45,27 m³/m²h
- U_{SL} = 67,90 m³/m²h

IV.5 – COMPARAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS PARA A RETENÇÃO TOTAL E DINÂMICA DE LÍQUIDO COM DADOS EXPERIMENTAIS E CORRELAÇÕES EXISTENTES NA LITERATURA

A Figura IV.18 mostra a retenção total de líquido para o sistema ar-água. Os valores da retenção total de líquido foram obtidos pela soma dos valores experimentais da retenção dinâmica e estática de líquido. Pode-se verificar que a retenção total aumenta com o aumento da carga líquida e muito pouco dependente do fluxo gasoso.

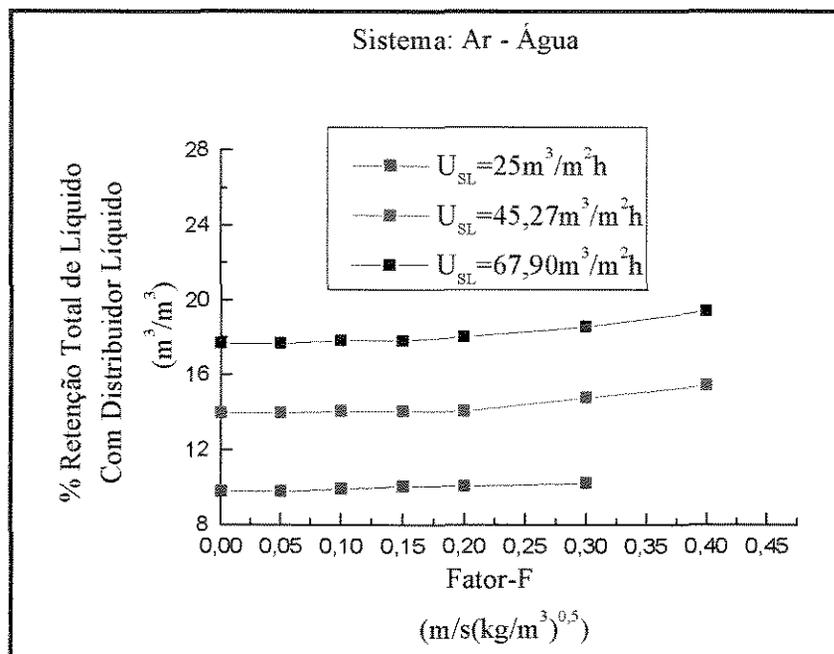


Figura IV.18 - % Retenção Total de Líquido vs Fator-F

As Figuras IV.19 e IV.20 mostram a comparação dos dados experimentais obtidos para a retenção total e dinâmica de líquido, para o sistema ar-água com os dados experimentais existentes na literatura (Suees e Spiegel (1992)) e com as correlações disponíveis para a predição de seu valor.

Até o momento, na literatura aberta, só são encontrados dados qualitativos relativos ao sistema ar-água, utilizando-se o recheio estruturado Mellapak 500Y. Os dados encontrados na literatura foram obtidos pela utilização da técnica de absorção por raios gama, que nos fornece a retenção total, não sendo possível pela utilização deste método, distinguir-se entre as porções estática e dinâmica de retenção de líquido. Pode-se verificar na Figura IV.19, que os dados experimentais obtidos neste trabalho, utilizando-se o método do esgotamento para a obtenção dos dados para a retenção dinâmica e o método volumétrico para a obtenção dos dados para a retenção estática, e calculando-se a retenção total pela soma dos dois acúmulos anteriores, encontram-se bem compatíveis com os dados disponíveis na literatura.

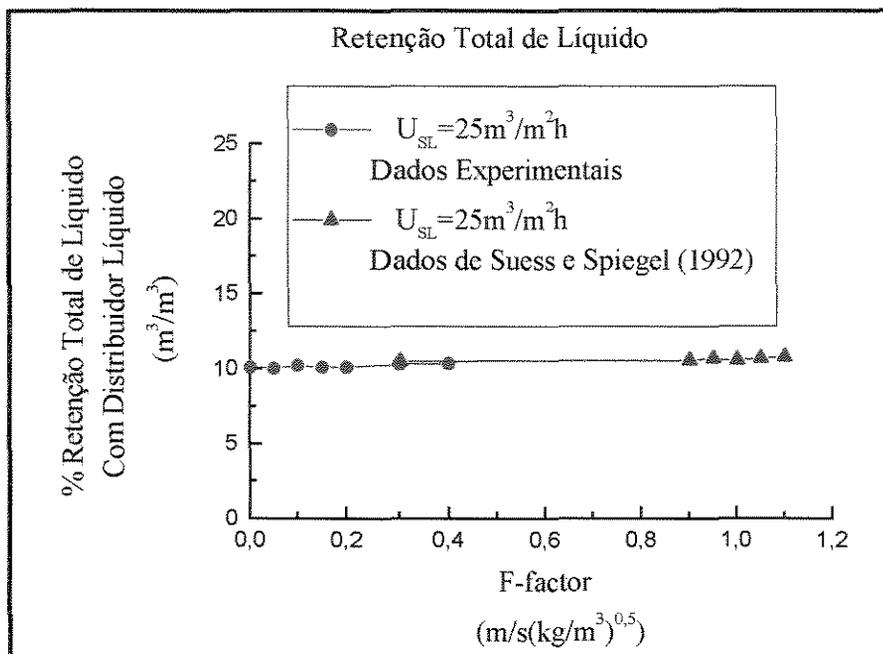


Figura IV.19 - % Retenção Total de Líquido vs Fator-F

A Figura IV.20 mostra a comparação entre os dados obtidos para a retenção total e dinâmica de líquido com os dados obtidos, para o sistema ar-água e fluxo gasoso nulo, utilizando-se as correlações disponíveis na literatura. Pode-se verificar que os dados obtidos pela utilização das diversas correlações disponíveis apresentam comportamentos similares, sendo que com a correlação de Suess e Spiegel (1992) apresentam valores sistematicamente inferiores, especialmente para baixas cargas líquidas. Os resultados experimentais obtidos apresentam comportamento semelhante em função da carga líquida, com os valores de retenção total de líquido muito próximos aos preditos pela correlação de Suess e Spiegel (1992).

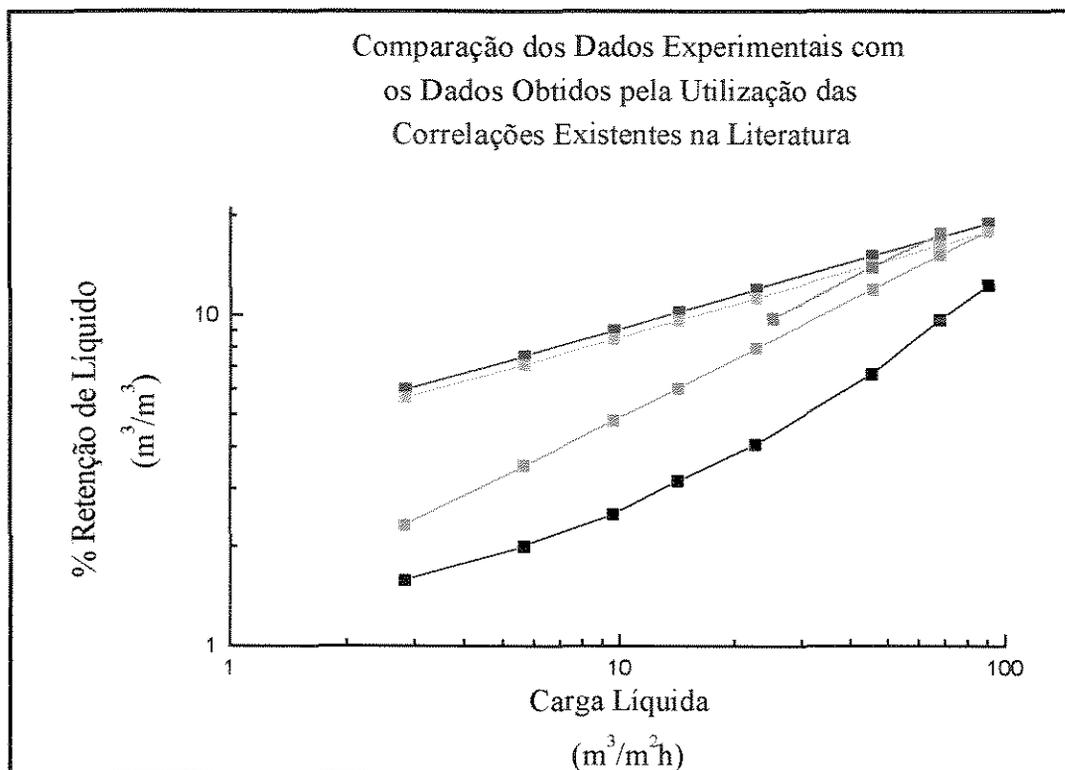


Figura IV.20 - % Retenção de Líquido vs Carga Líquida, onde:

- Retenção Dinâmica Experimental
- Correlação Spiegel e Suess (1992)
- Correlação de Billet e Schultes (1991)
- Correlação de Engel et al. (1997)
- Retenção Total Experimental

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser mencionadas neste trabalho:

1. Dispõe-se agora de um equipamento experimental que fornece dados experimentais reprodutíveis e representativos para a retenção de líquido quando comparados com os dados da literatura, ao se utilizar uma coluna empacotada com recheio estruturado.
2. O aumento da vazão de líquido aumenta a retenção dinâmica de líquido. O aumento da viscosidade da fase líquida amplia consideravelmente os valores observados da retenção dinâmica de líquido, podendo contribuir para o aumento da fração úmida do recheio, e da área de contato gás-líquido.
3. O fluxo gasoso tem uma influência muito pequena sobre a retenção dinâmica de líquido, a qual se torna um pouco mais acentuada com o aumento da vazão de líquido e com o aumento da viscosidade, quando não se utiliza distribuidor para a fase líquida.
4. Para sistemas de baixa viscosidade, a utilização de um distribuidor para a fase líquida tem uma forte influência na formação da retenção dinâmica de líquido.
5. Para sistemas viscosos, a utilização de um distribuidor para a fase líquida apresenta efeito similar à do fluxo gasoso em sistemas sem distribuidor.
6. O aumento da vazão de líquido aumenta a retenção estática de líquido e a variação do fluxo gasoso parece não apresentar nenhuma influência significativa na formação estática de líquido.

CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENNETT, B.; GOODRIDGE, C. 'HYDRODYNAMIC AND MASS TRANSFER STUDIES IN PACKED ABSORPTION COLUMNS. PART I: AXIAL LIQUID DISPERSION'. TRANS. INSTN. CHEM. ENGRS. 48, T232-T240 (1970).

BILLET, R.; MACKOWIAK, J. 'APPLICATION OF MODERN PACKINGS IN THERMAL SEPARATION PROCESS'. CHEM. ENG. TECHNOL. 11, 213-227 (1988).

BILLET, R.; SCHULTES, M. 'MODELLING OF PRESSURE DROP IN PACKED COLUMNS'. CHEM. ENG. TECHNOL. 14, 89-95 (1991).

BILLET, R.; SCHULTES, M. 'PREDICTING MASS TRANSFER IN PACKED COLUMN'. CHEM. ENG. TECHNOL. 16, 1-9 (1993).

BILLET, R.; SCHULTES, M. 'A PHYSICAL MODEL FOR THE PREDICTION OF LIQUID HOLD-UP IN TWO-PHASE COUNTERCURRENT COLUMNS'. CHEM. ENG. TECHNOL. 16, 370-375 (1993).

BOMIO, P. ET AL. 'IMPROVING SELECTIVITY, CAPACITY AND EFFICIENCY OF HYDROGEN SULPHIDE/CARBON DIOXIDE REMOVAL COLUMNS WITH SULZER STRUCTURED PACKING'. PRESENTED AT SULFHUR 88 (1988).

BRITO, M. H.; STOCKAR, U. VON; BANGERTER, A. M.; BOMIO, P.; LASO, M. 'EFFECTIVE MASS-TRANSFER AREA IN A PILOT PLANT COLUMN EQUIPPED WITH STRUCTURED PACKINGS AND WITH CERAMIC RINGS'. IND. ENG. CHEM. RES. 33, 647-656 (1994).

BRUNAZZI, E.; NARDINI, G.; PAGLIANTI, A.; PETARCA, L. 'INTERFACIAL AREA OF MELLAPAK PACKING: ABSORPTION OF 1,1,1-TRICHLOROETHANE BY GENOSORB 300'. CHEM. ENG. TECHNOL., 248-255 (1995).

BUCHANAN, J. E. 'OPERATING HOLDUP ON FILM-TYPE PACKINGS'. AICHE J. 34, 5, 870-872 (1988).

ELGIN, J. C.; WEISS, F. B. 'LIQUID HOLDUP AND FLOODING IN PACKED TOWERS'. IND. AND ENG. CHEM. 31, 4, 435-445 (1939).

ENGEL, V. *ET AL.* 'A NEW MODEL TO PREDICT LIQUID HOLDUP IN PACKED COLUMNS – USING DATA BASED ON CAPACITANCE MEASUREMENT TECHNIQUES'. ABSORPTION AND DISTILLATION MEETING, 939-947 (1997).

FAIR, J. R.; BRAVO, J. L. 'DISTILLATION COLUMNS CONTAINING STRUCTURED PACKING'. CHEM. ENG. PROG., 19-29 (1990).

KOKAL, S. L.; STANISLAV, J. F. 'AN EXPERIMENTAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW IN SLIGHTLY INCLINED PIPES – II. LIQUID HOLDUP AND PRESSURE DROP'. CHEM. ENG. SCI. 44, 3, 681-693 (1989).

KUSHALKAR, K. B.; PANGARKAR, V. G. 'LIQUID HOLDUP AND DISPERSION IN PACKED COLUMNS'. CHEM. ENG. SCI. 45, 3, 759-763 (1990).

MACKOWIAK, J. 'DETERMINATION OF FLOODING GAS VELOCITY AND LIQUID HOLDUP AT FLOODING IN PACKED COLUMNS FOR GAS/LIQUID SYSTEMS'. CHEM. ENG. TECHNOL. 13, 184-196 (1990).

PERIÓDICO I: STRUCTURED PACKINGS FOR DISTILLATION AND ABSORPTION (SULZER BROTHERS).

PERIÓDICO II: LABORATORY AND PILOT-SCALE DISTILLATION (SULZER BROTHERS).

PINTO, R. T. P.; MEIRELLES, A. J. A.; MARIA REGINA, W. M. 'ESTUDO E DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO ACÚMULO DE LÍQUIDO DINÂMICO UTILIZANDO COLUNAS EMPACOTADAS COM O RECHEIO ESTRUTURADO MELLAPAK 500Y'. PRIMEIRO CONGRESSO DE ENGENHARIA DE PROCESSOS DO MERCOSUL, 303-304 (1997).

PINTO, R. T. P.; MEIRELLES, A. J. A.; MARIA REGINA, W. M. 'ESTUDO E DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE NO ACÚMULO DINÂMICO DE LÍQUIDO ("HOLDUP") EM COLUNAS COM O RECHEIO ESTRUTURADO MELLAPAK 500Y'. ANNAIS XXV CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS (1997).

RAO, K. R. 'PREDICTION OF LIQUID FILM MASS TRANSFER COEFFICIENTS IN PACKED COLUMNS USING LIQUID HOLDUP'. CAN. J. OF CHEM. ENG. 71, 685-688 (1993).

ROBINSON, K. 'TRAYS OR PACKINGS – WHICH TO CHOOSE?'. CHEM. ENG., 23-26 (1991).

SÁEZ, A. E.; YÉPEZ, M. M.; CABRERA, C.; SORIA, E. M. 'STATIC LIQUID HOLDUP IN PACKED BEDS OF SPHERICAL PARTICLES'. AICHE J. 37, 11, 1733-1736 (1991).

SCHUBERT, C. N.; LINDNER, J. R.; KELLY, R. M. 'EXPERIMENTAL METHODS FOR MEASURING STATIC LIQUID HOLDUP IN PACKED COLUMNS'. AICHE J. 32, 11, 1920-1923 (1986).

SHULMAN, H. L.; ULLRICH, C. F.; WELLS, N. 'PERFORMANCE OF PACKED COLUMNS: I. TOTAL, STATIC, AND OPERATING HOLDUPS'. AICHE J. 1, 2, 247-253 (1955-I).

SPEKULJAK, Z.; BILLET, R. 'PRESSURE GRADIENT OF THE GASEOUS PHASE IN REGULAR PACKINGS'. LATIN AMERICAN APPLIED RESEARCH 19, 133-145 (1989).

STIKKELMAN, R.; GRAAUW, J.; OLUJIC, Z.; TEEUW, H.; WESSELINGH, H. 'A STUDY OF GAS AND LIQUID DISTRIBUTIONS IN STRUCTURED PACKINGS'. CHEM. ENG. TECHNOL. 12, 445-449 (1989).

SUESS, P.; SPIEGEL, L. 'HOLD-UP OF MELLAPAK STRUCTURED PACKINGS'. CHEM. ENG. PROC. 31, 119-124 (1992).

URRUTIA, G.; BONELLI, P.; CASSANELLO, M. C.; CUKIERMAN, A. L. 'ON DYNAMIC LIQUID HOLDUP DETERMINATION BY THE DRAINAGE METHOD'. CHEM. ENG. SCI. 51, 15, 3721-3726 (1996).

WEILAND, R. H.; AHLGREN, K. R. 'MASS-TRANSFER CHARACTERISTIC OF SOME STRUCTURED PACKINGS'. IND. ENG. CHEM. RES. 32, 1411-1418 (1993).

ANEXO I – SISTEMAS ESTUDADOS NÃO APRESENTADOS NO CORPO PRINCIPAL DA TESE

- Estado Estacionário

1. Ar – Água – Etilenoglicol

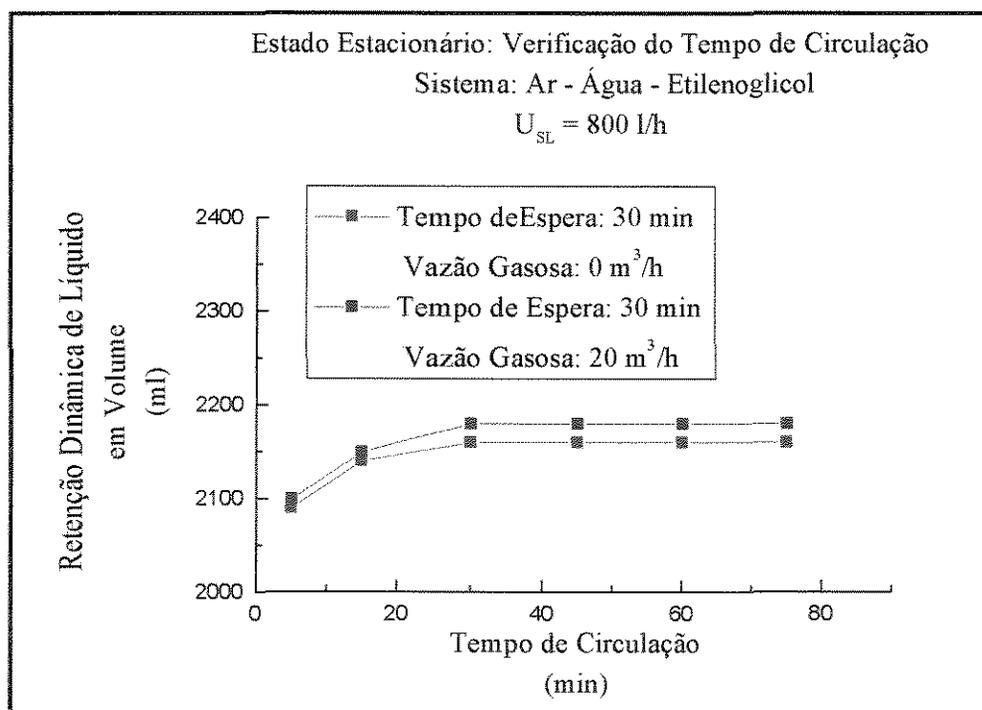


Figura IV.4 – Retenção Dinâmica de Líquido vs Tempo de Circulação

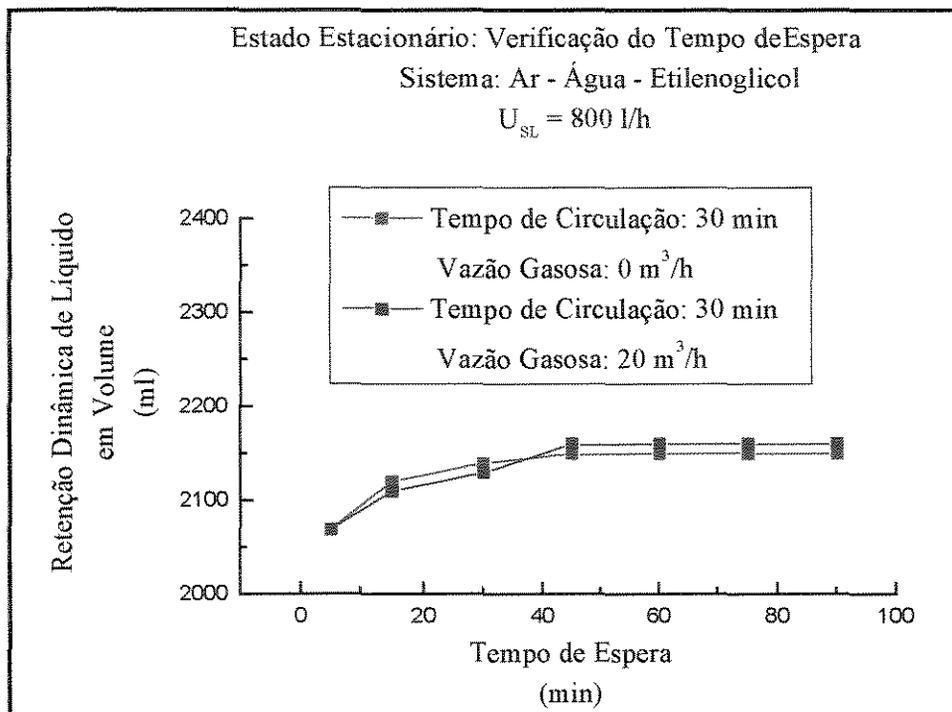


Figura IV.5 – Retenção Dinâmica de Líquido vs Tempo de Espera

2. Sistema: Ar - Etilenoglicol

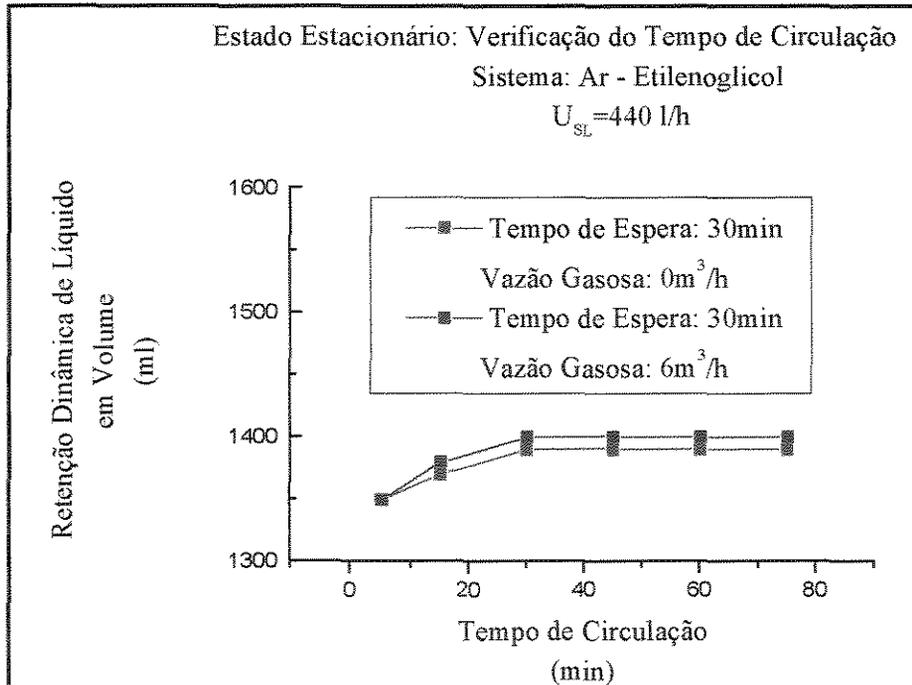


Figura IV.6 – Retenção Dinâmica de Líquido vs Tempo de Circulação

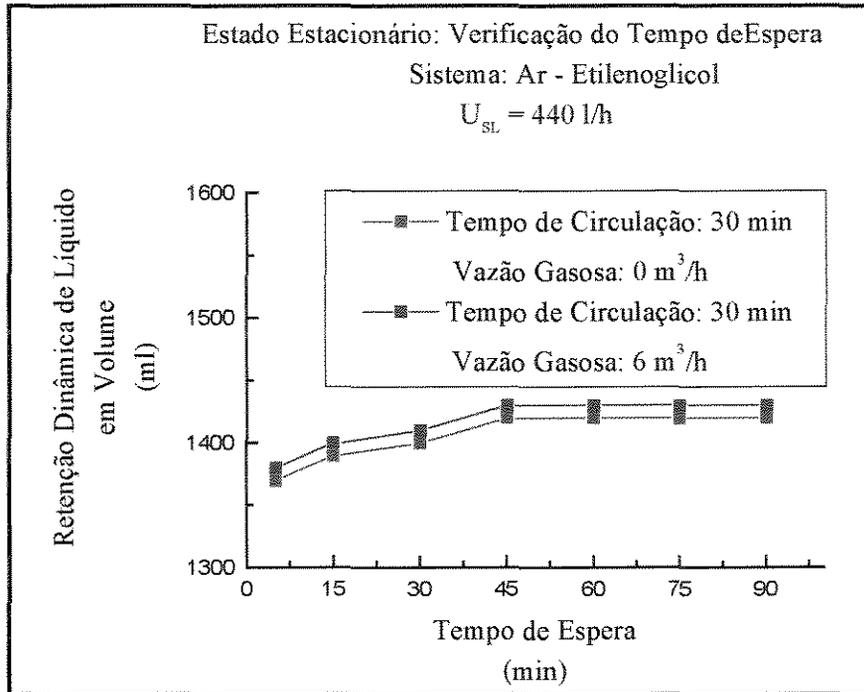


Figura IV.7 – Retenção Dinâmica de Líquido vs Tempo de Espera

- Condições Operacionais

3. Sistema: Ar – Etilenoglicol

A_{ST} (m^2)	V_{EE} (m^3)	d_G (kg/m^3)	V_L (l/h)	Q_G (m^3/h)	u_G (m/s)	F-factor ($m/s(kg/m^3)^{0.5}$)	C_L (m^3/m^2h)	h_D (ml)	$\%h_D$ (m^3/m^3)
0,017672	0,01895	1,178	230,88	0	0	0	13,06	750	3,95
				6	0,0943	0,10		880	4,64
				12	0,1882	0,20		880	4,64
0,017672	0,01895	1,178	440	0	0	0	25	1370	7,22
				6	0,0943	0,10		1540	8,12
				12	0,1882	0,20		1540	8,12
0,017672	0,01895	1,178	670,88	0	0	0	37,96	2160	11,39
				6	0,0943	0,10		2220	11,71
				12	0,1882	0,20		2280	12,02
0,017672	0,01895	1,178	880	0	0	0	49,79	2820	14,87
				6	0,0943	0,10		2950	15,56
				12	0,1882	0,20		3020	15,93

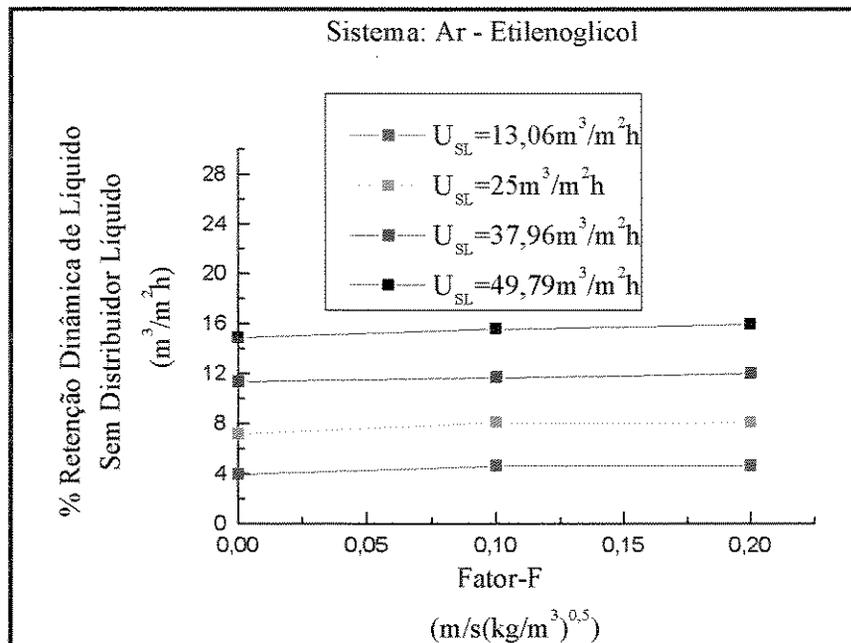


Figura IV.14 – Retenção Dinâmica de Líquido vs Fator-F

4. Sistema: Ar – Água – Etilenoglicol

A _{ST} (m ²)	V _{EE} (m ³)	d _G (kg/m ³)	V _L (l/h)	Q _G (m ³ /h)	v _G (m/s)	F-factor (m/s(kg/m ³) ^{0,5})	C _L (m ³ /m ² h)	h _D (ml)	%h _D (m ³ /m ³)
0,017672	0,01895	1,178	440	0	0	0	25	1620	8,54
				3	0,0471	0,0511		1620	8,54
				6	0,0943	0,1023		1620	8,54
				9	0,1414	0,1535		1620	8,54
				12	0,1886	0,2047		1630	8,60
				18	0,2829	0,3070		1640	8,65
				24	0,3772	0,4094		1640	8,65
				30	0,4715	0,5118		1650	8,70
0,017672	0,01895	1,178	800	0	0	0	45,27	2120	11,18
				3	0,0471	0,0511		2120	11,18
				6	0,0943	0,1023		2160	11,39
				9	0,1414	0,1535		2160	11,39
				12	0,1886	0,2047		2180	11,50
				18	0,2829	0,3070		2180	11,50
				24	0,3772	0,4094		2180	11,50
				30	0,4715	0,5118		2180	11,50

A_{ST} (m^2)	V_{EE} (m^3)	d_G (kg/m^3)	V_L (l/h)	Q_G (m^3/h)	v_G (m/s)	F-factor ($m/s(kg/m^3)^{0,5}$)	C_L (m^3/m^2h)	h_D (ml)	$\%h_D$ (m^3/m^3)
0,017672	0,01895	1,178	1200	36	0,5658	0,6141	67,90	2180	11,50
				3	0,0471	0,0511		2980	15,72
				6	0,0943	0,1023		3020	15,93
				9	0,1414	0,1535		3020	15,93
				12	0,1886	0,2047		3020	15,93
				18	0,2829	0,3070		3020	15,93
				24	0,3772	0,4094		3020	15,93
				30	0,4715	0,5118		3020	15,93
				36	0,5658	0,6141		3020	15,93

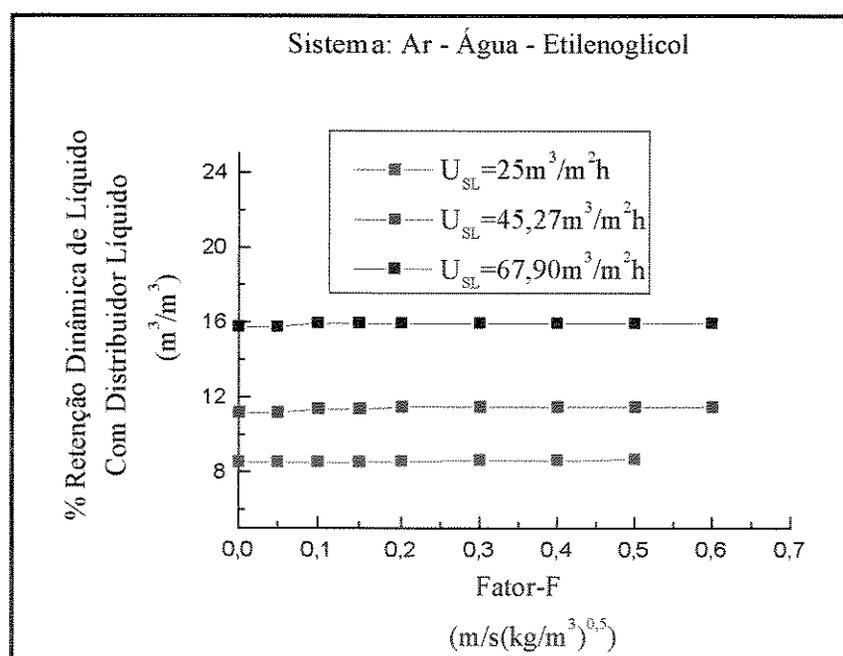


Figura IV.17 – Retenção Dinâmica de Líquido vs Fator-F

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar estudos da influência da viscosidade da solução líquida na formação da retenção estática de líquido.

Realizar estudos da influência da tensão superficial da solução líquida sobre retenção dinâmica e estática de líquido.

Verificar as influências da área geométrica do recheio e dos materiais de construção do recheio sobre as retenções estática e dinâmica de líquido.

Realizar experimentos de área efetiva de transferência de massa dentro das mesmas condições experimentais e propriedades físico-químicas do líquido estudadas aqui.