



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

## TRANSFERÊNCIA DE MASSA GÁS-LÍQUIDO EM LEITOS CENTRÍFUGOS.

AUTOR: Dorival Silvestre Amatuzy

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

CO-ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sandra Lúcia da Cruz

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

JUNHO/1999.

5009166



|           |                                     |
|-----------|-------------------------------------|
| UNIDADE:  | BC                                  |
| N.º C.º:  | Am15t                               |
| V.        | Ex.                                 |
| TOMBO BC/ | 38448                               |
| PROC.     | 229/99                              |
| C         | <input type="checkbox"/>            |
| D         | <input checked="" type="checkbox"/> |
| P.º CO    | R\$ 11,00                           |
| DATA      | 24/08/99                            |
| N.º CPD   |                                     |



CM-00125582-5

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

Am15t

Amatuzy, Dorival Silvestre

Tranferência de massa gás-líquido em leitos  
centrífugos. / Dorival Silvestre Amatuzy.--Campinas,  
SP: [s.n.], 1999.

Orientadores: João Alexandre Ferreira da Rocha  
Pereira, Sandra Lúcia da Cruz.

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

1. Massa - Transferência. 2. Separação (Tecnologia).  
I. Pereira, João Alexandre Ferreira da Rocha. II. Cruz,  
Sandra Lúcia da. III. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III.  
Título.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 29 de junho de 1999 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:



---

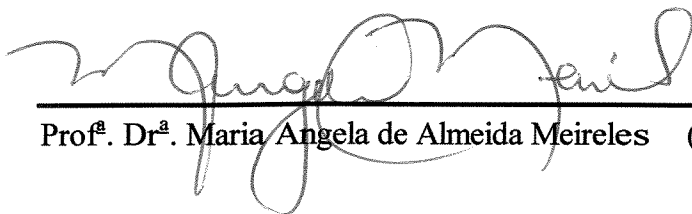
Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira (DESQ/FEQ – UNICAMP)

Orientador



---

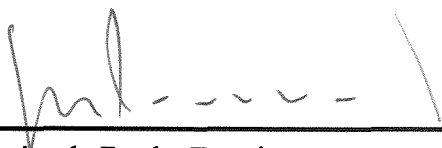
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Teresa Massako Kakuta Ravagnani (DESQ/FEQ – UNICAMP)



---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Maria Angela de Almeida Meireles (FEA – UNICAMP)

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida por Dorival Silvestre Amatuze e aprovada pela Comissão Julgadora em 29/06/1999.



---

Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira  
Orientador



Dedico este Trabalho aos  
meus pais Jorge e Margarida  
e à minha Esposa Marta.

## Agradecimentos:

Agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade de realizar este trabalho, provendo-me de vida e saúde.

Ao Professor Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira, meu orientador, pela dedicação, apoio, amizade e conhecimentos técnico-científicos.

À Professora Dra. Sandra Lúcia da Cruz, minha coorientadora, pelas sugestões e ensinamentos.

Ao Colaborador e amigo Daniel Soares de Moura, cujo trabalho foi de elevada importância nas etapas de construção e montagem do equipamento.

À minha esposa, Marta Wilk Donida, pelo auxílio e compreensão.

Aos colegas Alexandre, Ana Paula, Márcia, Eliana, Arlan, Paulo, Joseane, Fernando, Adriana, Frede, João, Renato e Sergio pelo companheirismo e amizade.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo suporte financeiro.

# Sumário:

| <b>Seção – Assunto</b>                                          | <b>Página</b> |
|-----------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>1 – Introdução</b>                                           | <b>01</b>     |
| <b>2 – Revisão Bibliográfica</b>                                | <b>05</b>     |
| 2.1 – O Equipamento Centrífugo                                  | 06            |
| 2.2 – Hidrodinâmica de Equipamentos de Contato Gás-Líquido      | 08            |
| 2.2.1 – Hidrodinâmica de Equipamentos Centrífugos               | 08            |
| 2.2.2 – Hidrodinâmica de Torres Convencionais                   | 17            |
| 2.3 – Fundamentos de Transferência de Massa                     | 20            |
| 2.4 – Transferência de Massa em Leitos Centrífugos              | 24            |
| 2.5 – Transferência de Massa em Torres de Recheio Convencionais | 32            |
| <b>3 – Equipamentos, Materiais e Métodos</b>                    | <b>35</b>     |
| 3.1 – Equipamentos                                              | 36            |
| 3.1.1 – Construção e Montagem do Equipamento Centrífugo         | 37            |
| 3.1.2 – Sistema de Alimentação e Distribuição da Fase Líquida   | 39            |
| 3.1.3 – Sistema de Alimentação da Fase Gasosa                   | 40            |
| 3.1.4 – Sistema de Transmissão Mecânica                         | 42            |
| 3.1.5 – Sistema de Controle de Temperatura                      | 44            |
| 3.1.6 – Manômetro de Tubo em U                                  | 44            |
| 3.1.7 – Enchimento de Recheio                                   | 44            |
| 3.1.8 – Medidas de Concentração                                 | 45            |
| 3.2 – Materiais                                                 | 46            |
| 3.3 – Metodologia                                               | 48            |
| 3.3.1 – Hidrodinâmica                                           | 48            |
| 3.3.1.1 – Efeito do Injetor na Hidrodinâmica                    | 48            |
| 3.3.1.2 – Determinação da Faixa de Operação Estável             | 49            |
| 3.3.2 – Transferência de Massa                                  | 49            |
| 3.3.2.1 – Metodologia Experimental                              | 50            |
| 3.3.2.2 – Balanço de Massa no Equipamento                       | 51            |

|                                                                                   |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 3.3.2.3 – Determinação de Coeficientes de Transferência Experimentais             | 52            |
| 3.3.2.4 – Predição de Equilíbrio Termodinâmico                                    | 55            |
| 3.3.2.5 – Coeficientes de Transferência de Massa para Leitos Convencionais        | 58            |
| <b>4 – Resultados e Discussão</b>                                                 | <b>60</b>     |
| 4.1 – Hidrodinâmica                                                               | 61            |
| 4.1.1 – Mecanismo de Injeção da Fase Líquida                                      | 61            |
| 4.1.1.1 – Resultados Injetor 01                                                   | 62            |
| 4.1.1.2 - Resultados Injetor 02                                                   | 64            |
| 4.1.1.2 - Resultados Injetor 03                                                   | 66            |
| 4.1.2 – Comportamento Hidrodinâmico do Leito de Recheio Centrífugo                | 67            |
| 4.2 – Transferência de Massa                                                      | 72            |
| 4.2.1 – Determinação dos Coeficientes de Transf. de Massa para o Leito Centrífugo | 72            |
| 4.2.2 – Determinação da Correlação Empírica para o Coef. de Transf. de Massa      | 85            |
| 4.2.3 – Avaliação Comparativa entre Equipamentos Centrífugos e Convencionais      | 87            |
| <b>5 – Conclusão e Sugestões</b>                                                  | <b>91</b>     |
| 5.1 – Conclusões                                                                  | 92            |
| 5.2 – Sugestões para Próximos Trabalhos                                           | 94            |
| <br><b>Bibliografia</b>                                                           | <br><b>95</b> |
| <b>Apêndice A – Experimentos de Hidrodinâmica</b>                                 | <b>98</b>     |
| <b>Apêndice B – Experimentos de Transferência de Massa</b>                        | <b>120</b>    |

# Índice de Figuras:

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Diagrama Esquemático do Leito de Recheio Centrífugo             | 07 |
| Figura 2.2 – Correlação de Inundação de Sherwood                             | 09 |
| Figura 2.3 – Queda de Pressão                                                | 10 |
| Figura 2.4 – Queda de Pressão em Leitos de Recheio                           | 18 |
| Figura 2.5 – Correlação de Queda de Pressão de Eckert                        | 19 |
| Figura 2.6 – Perfil de Concentração para Dessorção                           | 21 |
| Figura 3.1 – Sistema Experimental                                            | 36 |
| Figura 3.2 – Detalhes Mecânicos do Equipamento Centrífugo                    | 38 |
| Figura 3.3 – Dispositivo de Injeção e Distribuição da Fase Líquida           | 39 |
| Figura 3.4 – Curva de Calibração do Rotâmetro para a Fase Líquida            | 40 |
| Figura 3.5 – Curva de Calibração Rotâmetro de Alta Vazão para a Fase Gasosa  | 41 |
| Figura 3.6 - Curva de Calibração Rotâmetro de Baixa Vazão para a Fase Gasosa | 41 |
| Figura 3.7 – Sistema de Transmissão Mecânica                                 | 43 |
| Figura 3.8 – Velocidade de Rotação vs. Frequência de Alimentação do Motor    | 43 |
| Figura 3.9 – Curva de Calibração Espectrofotômetro                           | 46 |
| Figura 3.10 – Correntes de Escoamento no Equipamento Centrífugo              | 51 |
| Figura 4.1 – Arraste de Líquido para Injetor 01, $G = 60$ l/min              | 62 |
| Figura 4.2 – Arraste de Líquido para Injetor 01, $G = 80$ l/min              | 63 |
| Figura 4.3 – Arraste de Líquido para Injetor 02, $G = 45$ l/min              | 64 |
| Figura 4.4 – Arraste de Líquido para Injetor 02, $G = 60$ l/min              | 65 |
| Figura 4.5 – Arraste de Líquido para Injetor 02, $G = 80$ l/min              | 65 |
| Figura 4.6 – Arraste de Líquido para Injetor 03, $G = 80$ l/min              | 66 |
| Figura 4.7 – Arraste de Líquido para Recheio 03                              | 68 |
| Figura 4.8 – Arraste de Líquido para Recheio 02                              | 69 |
| Figura 4.9 – Arraste de Líquido para Recheio 01                              | 69 |
| Figura 4.10 – Queda de Pressão no Leito Centrífugo                           | 70 |
| Figura 4.11 – Efeito da Vazão de Ar na Queda de Pressão                      | 71 |
| Figura 4.12 – Efeito da Vazão de Líquido na Queda de Pressão                 | 72 |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.13 – Variação de $K_{Ga}$ com a Velocidade de Rotação             | 75 |
| Figura 4.14 – Variação de $K_{Ga}$ com a Velocidade de Rotação             | 76 |
| Figura 4.15 – Variação de $K_{Ga}$ com a Velocidade de Rotação             | 77 |
| Figura 4.16 – Variação de $K_{Ga}$ com a Velocidade de Rotação             | 78 |
| Figura 4.17 – Variação de $K_{Ga}$ com a Velocidade de Rotação             | 79 |
| Figura 4.18 – Variação de $K_{Ga}$ com a Velocidade de Rotação             | 79 |
| Figura 4.19 – Variação de $K_{Ga}$ com a Velocidade de Rotação             | 80 |
| Figura 4.20 – Variação de $K_{Ga}$ com a Velocidade de Rotação             | 81 |
| Figura 4.21 – Variação de $K_{Ga}$ com a Velocidade de Rotação             | 82 |
| Figura 4.22 – Variação de $K_{Ga}$ com a Vazão de Ar                       | 83 |
| Figura 4.23 – Variação de $K_{Ga}$ com a Vazão de Líquido                  | 84 |
| Figura 4.24 – Variação de $K_{Ga}$ com a Vazão de Líquido                  | 84 |
| Figura 4.25 – $K_{Ga}$ correlação vs. $K_{Ga}$ Experimental                | 86 |
| Figura 4.26 – $K_{Ga}$ correlação vs. $K_{Ga}$ Experimental                | 86 |
| Figura 4.27 – $K_{Ga}$ correlação vs. $K_{Ga}$ Experimental                | 87 |
| Figura 4.28 – $K_{Ga}$ correlação vs. $K_{Ga}$ Experimental                | 87 |
| Figura 4.29 – Comparação entre $K_{Ga}$ Convencional e $K_{Ga}$ Centrífugo | 88 |
| Figura 4.30 - Comparação entre $K_{Ga}$ Convencional e $K_{Ga}$ Centrífugo | 88 |

## Índice de Tabelas:

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1 –Características dos Recheios Analisados                    | 45 |
| Tabela 3.2 – Constantes de Antoine                                     | 47 |
| Tabela 3.3 – Equilíbrio Acetona – Água                                 | 47 |
| Tabela 4.1 – Faixa de Operação sem Arraste de Líquido                  | 67 |
| Tabela 4.2 – Faixa de Operação Estável                                 | 68 |
| Tabela 4.3 – Relações de Unidades                                      | 73 |
| Tabela 4.4 – Relações de Unidades                                      | 73 |
| Tabela 4.5 – Coeficientes de Transferência de Massa, $G = 30$ l/min    | 74 |
| Tabela 4.6 – Coeficientes de Transferência de Massa, $G = 45$ l/min    | 74 |
| Tabela 4.7 – Coeficientes de Transferência de Massa, $G = 60$ l/min    | 75 |
| Tabela 4.8 – Comparação entre Equipamentos Convencionais e Centrífugos | 89 |
| Tabela 4.9 - Comparação entre Equipamentos Convencionais e Centrífugos | 90 |

# Nomenclatura:

## - Letras Latinas:

- $a$  – área interfacial gás-líquido ( $m^2/m^3$ )
- $a_c$  – aceleração centrífuga ( $m/s^2$ )
- $a_p$  – área superficial do recheio ( $m^2/m^3$ )
- $D_G$  – difusividade do componente na fase gasosa ( $m^2/s$ )
- $D_L$  – difusividade do componente na fase líquida ( $m^2/s$ )
- $d_p$  – dimensão característica do recheio ( $m$ )
- $g$  – aceleração gravitacional ( $9,81 m/s^2$ )
- $G$  – vazão da fase gasosa ( $kg/m^2.s$ )
- $G_{MT}$  – vazão molar de gás total ( $mol/(m^2.s)$ )
- $G_S$  – vazão molar de gás inerte ( $mol/(m^2.s)$ )
- $H$  – constante da Lei de Henry ( $atm.m^3/mol$ )
- $H_C$  – constante da Lei de Henry
- $h_L$  – retenção de líquido no leito
- $k_G$  – coeficiente global de transferência de massa para a fase gasosa ( $mol/(atm.m^2.s)$ )
- $K_{Ga}$  – coeficiente global volumétrico de transf. de massa ( $mol/(atm.m^3.s)$ )
- $k_L$  – coeficiente de transferência de massa para a fase líquida ( $m/s$ )
- $K_{La}$  – coeficiente global volumétrico de transf. de massa ( $s^{-1}$ )
- $L$  – vazão da fase líquida ( $kg/m^2.s$ )
- $L_{RA}$  – Leitura rotâmetro de água ( $cm$ )
- $L_{arA}$  – Leitura rotâmetro de ar de alta vazão ( $mm$ )
- $L_{arB}$  – Leitura rotâmetro de ar de baixa vazão ( $mm$ )
- $L_{MT}$  – vazão molar da fase líquida ( $mol/(m^2.s)$ )
- $L_S$  – vazão molar de líquido inerte ( $mol/(m^2.s)$ )
- $N_A$  – taxa de transferência ( $mol/m^2.s$ )
- $P_T$  – Pressão Total ( $atm$ )
- $Q_L$  – vazão volumétrica da fase líquida ( $ml/min$ )
- $r_1$  – raio interno do rotor ( $m$ )
- $r_2$  – raio externo do rotor ( $m$ )
- $Rh$  – raio hidráulico ( $m$ )
- $U_G$  – velocidade superficial da fase gasosa ( $m/s$ )
- $U_L$  – velocidade superficial da fase líquida ( $m/s$ )
- $w$  – velocidade de rotação ( $s^{-1}$ )
- $x^0$  – composição molar da fase líquida em equilíbrio com a fase gasosa
- $X^0$  – razão molar da fase líquida em equilíbrio com a fase gasosa
- $x_1$  – composição molar da fase líquida na entrada do equipamento
- $X_1$  – razão molar da fase líquida na entrada do equipamento
- $x_2$  – composição molar da fase líquida na saída do equipamento



$X_2$  – razão molar da fase líquida na saída do equipamento  
 $x_i$  – composição molar da fase líquida na interface  
 $X_i$  – razão molar da fase líquida na interface  
 $y^0$  – composição molar da fase gasosa em equilíbrio com a fase líquida  
 $Y^0$  – razão molar da fase gasosa em equilíbrio com a fase líquida  
 $y_1$  – composição molar da fase gasosa na saída do equipamento  
 $Y_1$  – razão molar da fase gasosa na saída do equipamento  
 $y_2$  – composição molar da fase gasosa na entrada do equipamento  
 $Y_2$  – razão molar da fase gasosa na entrada do equipamento  
 $y_i$  – composição molar da fase gasosa na interface  
 $Y_i$  – razão molar da fase gasosa na interface  
 $z$  – altura do rotor ( $m$ )

- Letras gregas:

$\varepsilon$  - porosidade do recheio  
 $\sigma$  – tensão superficial crítica do líquido ( $N/m$ )  
 $\sigma_c$  – tensão superficial crítica do material ( $N/m$ )  
 $\rho_G$  - densidade da fase gasosa ( $kg/m^3$ )  
 $\mu_G$  - viscosidade da fase gasosa ( $kg/(m.s)$ )  
 $\rho_L$  - densidade da fase líquida ( $kg/m^3$ )  
 $\mu_L$  - viscosidade da fase líquida ( $kg/(m.s)$ )  
 $\rho_{ML}$  – densidade molar da fase líquida ( $mol/m^3$ )

- Números adimensionais:

$N_{Fr}=L^2 \cdot a_p / \rho_L \cdot g$  – número de Froude  
 $N_{RE}=L / a_p \mu_L$  – número de Reynolds  
 $N_{We}=L^2 / a_p \rho_L \sigma$  – número de Weber reduzido  
 $N_{Gr}=d_p^3 a_c \rho_G^2 / \mu_G^2$  – número de Grashof

# Resumo:

## TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM UM LEITO DE RECHEIO ROTATIVO

O desenvolvimento de equipamentos de alta performance é uma das preocupações mais frequentes nos dias de hoje nas áreas de pesquisa e projeto em Engenharia Química. O objetivo é desenvolver técnicas para obter equipamentos de pequena dimensão e intensificar a eficiência de separação, gerando plantas compactas e eficientes.

Sistemas de contato gás-líquido como destilação e absorção, normalmente requerem grandes colunas para obter elevados graus de separação. Nestas colunas a gravidade é a força motriz do escoamento e contato das duas fases.

A literatura cita que os leitos de recheio rotativos apresentam alta eficiência de separação em um equipamento de dimensões reduzidas comparado a uma coluna convencional. A alta velocidade de rotação fornece um forte campo centrífugo permitindo o uso de altas taxas de líquido e gás.

O objetivo deste trabalho foi a avaliação do comportamento hidrodinâmico e de transferência de massa de um leito de recheio rotativo através do estudo da dessorção de acetona de uma solução aquosa de acetona pelo ar. O leito foi operado em uma faixa de 500 e 5000 rpm. O contato entre as duas fases ocorre no leito de recheio contido no rotor de 10,5 cm de diâmetro externo, 4,0 cm de diâmetro interno e 3,0 cm de altura. A fase líquida escoava de dentro para fora do rotor devido à força centrífuga. A fase gasosa escoava de fora para dentro do rotor, em contracorrente com o líquido.

Foram realizados estudos do comportamento hidrodinâmico do equipamento, utilizando sistema água-ar, para obter a região de operação estável do equipamento, onde não ocorre arraste de líquido pela fase gasosa. Foram utilizadas vazões de ar de 10 - 80 l/min, vazões de líquido de 0,5 - 2,0 l/min e velocidades de rotação de 500 - 5000 rpm.

Os experimentos de transferência de massa, utilizando soluções aquosas de acetona (1,5 %) e ar, foram realizados operando o equipamento com velocidade de rotação e taxas de escoamento na região estável. Os valores experimentais de  $K_{Ga}$  foram determinados e os resultados mostraram que o coeficiente de transferência de massa foi dependente da velocidade de rotação e das vazões de líquido e ar. Os valores experimentais obtidos para o leito centrífugo foram 2 a 5 vezes mais altos que aqueles calculados para um leito de recheio convencional equivalente. Uma equação empírica foi ajustada para correlacionar os coeficientes experimentais de transferência de massa para o leito de recheio centrífugo. O sistema apresentou alta eficiência de separação em um equipamento de tamanho reduzido.

# Abstract:

## MASS TRANSFER IN A HIGH SPEED ROTATING PACKED BED

The development of high performance equipment is nowadays one of the most important preoccupations in chemical engineering research and design. The target is to devise techniques to obtain low dimension equipment and to intensify separation efficiency, generating compact and efficient plants.

Gas-liquid contact systems as absorption and distillation, normally require large columns to obtain high separation degrees. In these columns the gravity is the driving force for the flowing and contact of the two phases.

Literature reports that rotating packed beds present high efficiency with reduced dimension as compared to the conventional packed bed. The high rotating velocity provides a strong centrifugal field permitting the use of high rates of liquid and gas.

The purpose of this work is to evaluate the hydrodynamic and mass transfer behaviour of a rotating packed bed studying the stripping of acetone of an acetone-water solution by air. The bed was operated at 500 - 5000 rpm. The contact between the two phases occurs in the packed bed contained in a rotor with 10,5 cm outer diameter and 4,0 cm inner diameter being 3,0 cm high. Liquid flows from the inner edge to the outer edge of the rotor due to the centrifugal force. Gas flows inward from the outer edge to the inner edge countercurrently to the liquid.

The hydrodynamic behaviour of the equipment was studied using water-air, to obtain the region of stable operation, where liquid entrainment is absent. Air flow ranged from 10 to 80 l/min, and liquid ranged from 0,5 to 2,0 l/min and rotor velocity in the range from 500 - 5000 rpm.

Mass transfer experiments, using aqueous solutions of acetone (1,5 %) and air, were performed operating the equipment with rotation velocity and rates in the stable region. Experimental values of  $K_G a$  were determined and the results show that the mass transfer coefficient is dependent on the gas and liquid flow rates and rotation velocity, and their values are 2 to 5 times higher than those calculated for an equivalent conventional packed bed. An empirical equation was fitted to correlate the mass transfer experimental coefficients for rotating packed bed. The system presented high separation efficiency in a reduced size equipment.

# Capítulo I:

# Introdução

## 1 . INTRODUÇÃO

Os processos de transferência de massa gás-líquido são largamente empregados na engenharia química. Com o aumento de conhecimentos e o aperfeiçoamento de técnicas de separação, os equipamentos vem sendo gradualmente melhorados, tendo em vista o aumento na eficiência de separação.

Os equipamentos centrífugos, desenvolvidos para transferência de massa, constituem-se em grande avanço no projeto de equipamentos de separação, pois propiciam a obtenção de altas taxas de transferência em equipamentos de tamanho físico reduzido em relação aos comumente utilizados na indústria (torres convencionais).

As operações absorção/dessorção são realizadas, geralmente, em torres cilíndricas compostas internamente por estruturas que podem ser pratos ou enchimento de recheio. Esses equipamentos são volumosos e envolvem grande custo em sua construção e instalação. Além disso, convém salientar alguns inconvenientes observados nestes equipamentos tais como, baixo limite de inundação, tendência ao arraste de líquido pela fase gasosa para vazões de gás mais elevadas, formação de canais preferenciais diminuindo a eficiência de transferência de massa na torre exigindo a implementação de distribuidores ao longo desta.

Nos últimos anos vem ocorrendo uma intensa busca por técnicas que reduzam os custos das plantas industriais. O objetivo é desenvolver plantas compactas que minimizem os custos fixos, de instalação e de manutenção. Foi então criado, Ramshaw (1983), o conceito “Intensificação de Processos”, com o objetivo de desenvolver pequenos equipamentos com alta performance.

Dentre os benefícios da intensificação de um processo podem ser citados:

- redução dos custos fixos e de instalação;
- menor tempo de residência das correntes no equipamento;
- menor degradação térmica de substâncias sensíveis ao calor;
- maior segurança devido a menor relação de materiais tóxicos e inflamáveis;
- menor espaço físico ocupado pelo equipamento.

Em relação as torres de absorção/dessorção, poucas variações na configuração tradicional tem sido propostas e em sua maioria sem sucesso. Entretanto, uma variação que pode trazer bons resultados é o desenvolvimento de um dispositivo que explore a força gravitacional.

Se o campo gravitacional da Terra pudesse ser aumentado, a corrente líquida seria puxada mais vigorosamente para baixo e acarretaria em benefícios tais como:

- utilização de altas taxas de gás e líquido;
- formação de um filme líquido muito fino;
- utilização de recheio de alta área superficial;
- tendência a inundação reduzida;
- altos coeficientes de transferência de massa seriam obtidos, diminuindo o tamanho físico do equipamento, reduzindo custos capitais;
- menor tempo de residência da fase líquida no equipamento.

O campo gravitacional não pode ser aumentado, entretanto, ele pode ser substituído por um campo centrífugo obtido por meio da rotação de um leito de recheio especialmente montado. O leito de recheio é exposto à forças centrífugas que são muito mais fortes que a força gravitacional, resultando nas vantagens expressas acima.

O leito de recheio rotativo pode ser aplicado em operações tais como absorção, destilação, dessorção, extração e outros processos de separação. Apesar dos grandes benefícios do uso deste tipo de equipamento em operações de transferência de massa, poucas informações encontram-se publicadas na literatura, e dentre estas, poucos dados são apresentados, tornando difícil o uso dos modelos desenvolvidos nestes trabalhos para predição do comportamento do leito para outros sistemas. Faz-se necessário a realização de estudos das características do leito centrífugo para sistemas diferentes dos publicados, trabalhando em faixas de operação diferentes, visando a caracterização mais completa do equipamento.

Assim, o presente trabalho tem como objetivos:

- determinar o comportamento hidrodinâmico do leito centrífugo;
- determinar os coeficientes de transferência de massa do leito;
- analisar os efeitos da velocidade de rotação no desempenho do equipamento;
- estudar a influência das taxas de gás e de líquido no comportamento do sistema;
- avaliar a influência das características do recheio na performance do equipamento.

Através de experimentos hidrodinâmicos utilizando sistema água-ar, é estabelecida a região de operação estável do equipamento, onde não ocorre arraste de líquido. Por meio de experimentos de dessorção de acetona de uma solução aquosa de acetona através do ar, com equipamento operando na região estável, são obtidos os dados experimentais necessários à avaliação dos coeficientes de transferência de massa deste sistema no leito centrífugo.

# Capítulo 2:

## Revisão

## Bibliográfica



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas seguintes seções do presente capítulo será apresentada uma revisão global dos fundamentos hidrodinâmicos e de transferência de massa desenvolvidos para leitos centrífugos apresentados na literatura.

Também serão descritos alguns estudos relacionados ao projeto de torres convencionais, tendo como objetivo a comparação entre a performance destas em relação aos equipamentos centrífugos.

### 2.1 – O Equipamento Centrífugo

Os primeiros relatos de estudos dos efeitos das forças centrífugas em equipamentos de contato gás-líquido foram realizados por Vivian e colaboradores (1965). Em suas análises foi acoplado um leito de recheio a uma grande centrífuga, expondo o leito à forças centrífugas que variavam entre 1 e 6,4 vezes a força gravitacional.

No início da década de 80, Ramshaw e colaboradores (1983), desenvolveram um equipamento centrífugo denominado “HIGEE”, nome relacionado ao seu alto limite de inundação. A alta velocidade de rotação proporcionava ao equipamento aceleração que variava entre 100 e 1000 vezes à força gravitacional. Daquela época até nossos dias o equipamento “HIGEE” sofreu algumas alterações, mas de uma forma geral, mantém a maioria das características originais.

O equipamento centrífugo consiste basicamente de uma câmara estacionária que contém em seu interior um rotor, que é acoplado por um eixo a um motor que é instalado fora da câmara. A câmara, geralmente, é construída com paredes de vidro transparente permitindo a visualização do regime de escoamento em seu interior. Na base da câmara estão localizadas a entrada da fase gasosa e a saída da fase líquida. O rotor é acoplado à câmara na parte superior, e pelo centro deste

ocorre a alimentação da fase líquida e a saída da fase gasosa, como é mostrado no diagrama esquemático apresentado na Figura 2.1.

O rotor é formado por dois discos circulares metálicos presos entre si por hastes, caracterizando o que se pode chamar de cilindro chato. No interior do rotor fica contido o enchimento de recheio onde ocorre o contato entre as fases.

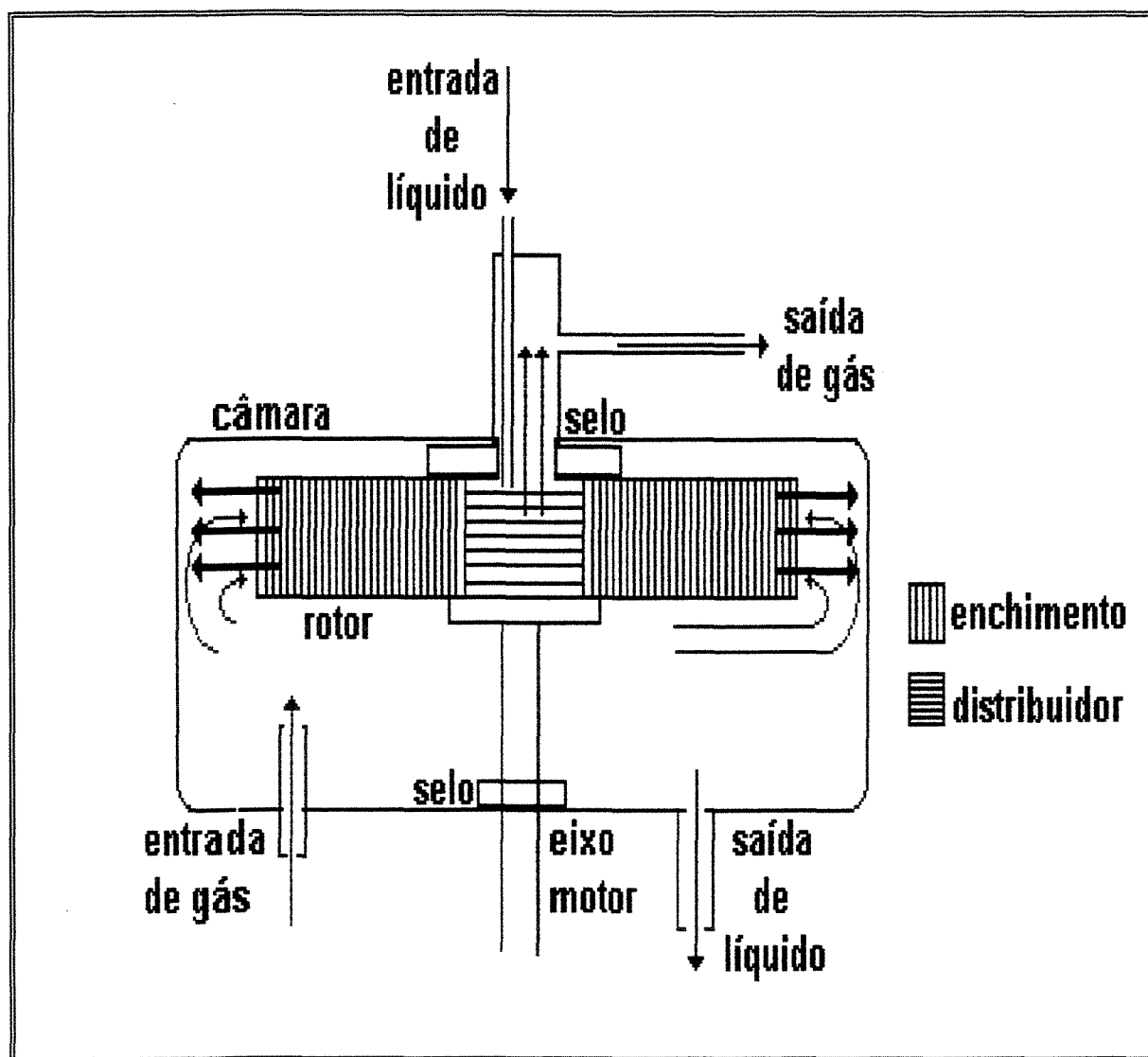


Figura 2.1 – Diagrama Esquemático do Leito de Recheio Centrífugo.

A fase líquida é alimentada no centro do rotor e escoar para fora deste impulsionada pela força centrífuga, ao deixar o rotor o líquido é arremessado contra a parede da câmara e flui por gravidade para fora do equipamento. A fase gasosa escoar de fora para dentro do rotor devido a um gradiente de pressão imposto. O contato entre as fases é estabelecido em contracorrente no interior do leito de recheio. Um fator a ser observado é a área de escoamento que não é constante como nas torres convencionais.

## 2.2 – Hidrodinâmica de Equipamentos de Contato Gás – Líquido

O fluxo de fluidos através de leitos constituídos por partículas é uma situação comum na engenharia, e é necessário o conhecimento do comportamento do escoamento das fases para estes sistemas.

No caso das operações de absorção/dessorção o desempenho da separação está relacionado à eficiência de contato entre as fases, proporcionado pelo equipamento. Quanto maiores são a área e o tempo de contato entre as fases melhor é a performance de transferência de massa do equipamento.

### 2.2.1 – Hidrodinâmica de Equipamentos Centrífugos.

Nos leitos centrífugos a fase líquida é alimentada no centro do rotor e flui para fora deste devido a força centrífuga, com o gás escoando em contracorrente com o líquido. A principal vantagem do equipamento é que o limite de inundação é grandemente aumentado comparado a uma coluna convencional. O benefício da rotação pode então ser usado na redução da área da secção transversal de escoamento. Além disso, a rotação também permite o uso de recheio de alta área superficial específica aumentando a performance de transferência de massa do equipamento.

A elevada capacidade hidráulica do equipamento centrífugo pode ser justificada por algumas suposições, Ramshaw (1983), em relação a correlação de inundação de Sherwood, como mostra a Figura 2.2.

Para uma determinada taxa de escoamento gás-líquido é obtido o valor da ordenada  $(U_g^2 a_p / g \varepsilon^3) \cdot (\rho_g / \rho_l) \cdot \mu^{0.2}$  e da abcissa  $(L / G) \cdot (\rho_g / \rho_l)^{0.5}$ . Se o fator “g” relacionado à aceleração da gravidade for substituído pela aceleração centrífuga, que é bem maior, será possível o uso de maior velocidade da fase gasosa “ $U_g$ ” e enchimento de recheio com maior área superficial específica “ $a_p$ ”, propiciando um aumento da capacidade hidráulica que será refletida na performance de transferência de massa.

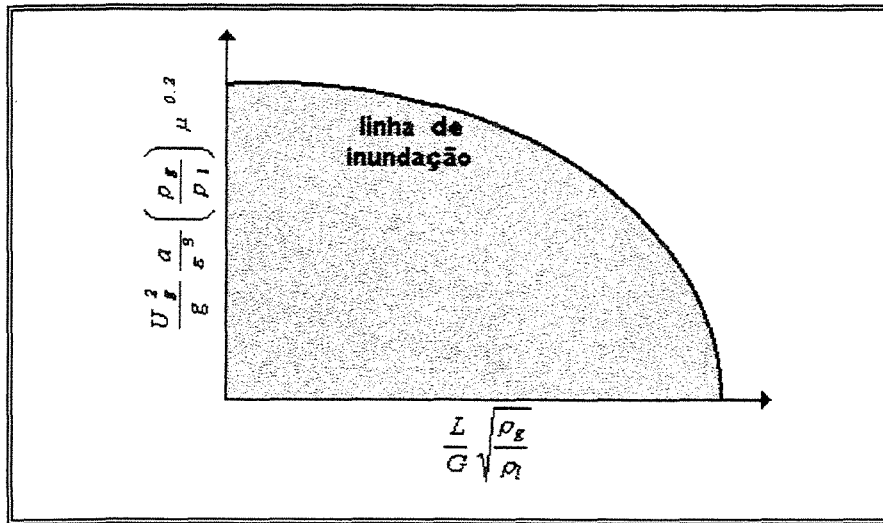


Figura 2.2 – Correlação de Inundação de Sherwood (Ramshaw, 1983).

Na avaliação da capacidade hidráulica do leito centrífugo observa-se que a aceleração centrífuga varia com o raio do rotor assumindo o menor valor no centro deste. Além disso, a menor área da secção transversal de escoamento também ocorre neste ponto, resultando na maior velocidade de escoamento das fases nesta parte do equipamento. Pode-se então verificar que a capacidade hidráulica do equipamento está diretamente relacionada a área de escoamento no centro do rotor, uma vez que, se viesse a ocorrer inundação, esta se iniciaria neste ponto.

Keyane e Gardner (1989) desenvolveram um leito centrífugo que era composto por um rotor de alumínio maciço com alta porosidade (92 %), e que foi operado entre 500 e 2000 rpm fornecendo um campo centrífugo correspondente a 60 - 1000 vezes a força gravitacional.

Em suas avaliações hidrodinâmicas foram observados alguns fenômenos peculiares como mostra a Figura 2.3. Quando o leito de recheio foi operado somente com a fase gasosa (leito seco) foi observado que a queda de pressão medida era maior que a obtida quando estavam presentes as duas fases (leito molhado), fato curioso, já que nas torres de recheio convencional ocorre o inverso.

Tanto para o leito seco como para o leito molhado a queda de pressão obtida foi dependente da velocidade de rotação na potência 2, com taxas de escoamento das fases líquida e gasosa constantes. Keyane concluiu de seus experimentos que a queda de pressão aumenta com o aumento da taxa de escoamento da fase gasosa, sendo que os maiores valores de queda de pressão correspondem às mais altas velocidades de rotação (efeito rotacional); e os pontos de inundação não foram encontrados para a faixa de operação testada, que correspondia a taxas de escoamento da fase gasosa de até  $2,2 \text{ kg/m}^2.\text{s}$  e da fase líquida de até  $36 \text{ kg/m}^2.\text{s}$ .

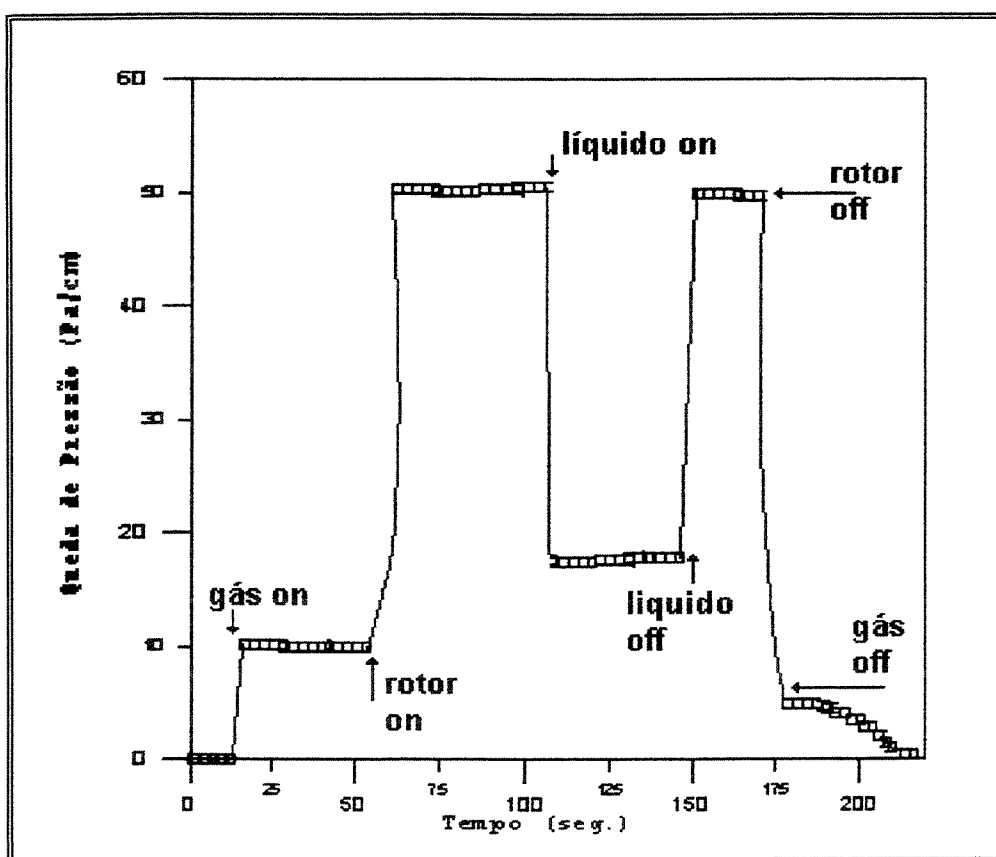


Figura 2.3 – Queda de Pressão (Keyane e Gardner, 1989).

Kumar e Rao (1990) desenvolveram uma correlação de queda de pressão para os leitos centrífugos. As análises de queda de pressão foram executadas com o rotor formado por discos anulares planos com um espaçamento uniforme. Foi assumido que a fase líquida escoava sobre os discos, em ambos os lados dos mesmos, na forma de um filme fino, além disso, foi considerado que a fase gasosa escoava através dos canais formados entre os discos que estavam cobertos com o filme líquido, e a distribuição do gás entre os canais foi assumida uniforme. No desenvolvimento desta correlação foi admitido que a queda de pressão no leito ( $\Delta P$ ) ocorria devido às forças de atrito ( $\Delta P_F$ ), forças centrífugas ( $\Delta P_C$ ) e ao ganho de energia cinética rotacional ( $\Delta P_K$ ), como é descrito pela equação 2.1.

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_f + \Delta P_k \quad (2.1)$$

A queda de pressão, em relação às forças centrífugas, foi assumida como função da velocidade de rotação ( $w$ ), dos raios interno e externo do rotor ( $r_1$ ,  $r_2$ ) e da densidade da fase gasosa ( $\rho_g$ ), como é expresso pela equação 2.2. O fator de correção ( $K_S$ ) foi avaliado para velocidades de rotação 610 e 1150 rpm e corresponderam aos valores 0,73 e 0,51 respectivamente.

$$\Delta P_c = \frac{1}{2} \rho_g (K_s w)^2 (r_2^2 - r_1^2) \quad (2.2)$$

A equação 2.3, desenvolvida para a queda de pressão relacionada as forças de atrito, ( $\Delta P_F$ ) foi assumida como função do raio externo do rotor ( $r_2$ ), vazão ( $G$ ), densidade da fase gasosa ( $\rho_g$ ), área superficial ( $a_p$ ), porosidade do recheio ( $\epsilon$ ), e ( $\Delta I$ ) que foi determinado em função das características físicas do rotor e da fase líquida.

$$\Delta P_f = \frac{1}{2} (K_a f) r_2^2 \frac{G^2}{\rho_g} \frac{a_p (1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \Delta I \quad (2.3)$$

O fator de atrito ( $K_{af}$ ) foi determinado experimentalmente para o equipamento centrífugo, e foi determinada uma correlação em função do número de Reynolds da fase gasosa,  $Re_g = (4 R_h G / \mu_g)$ , e do número de Reynolds rotacional,  $Re_\theta = (K_s w.r_2^2 \rho_g / \mu_g)$ , expressa pela equação 2.4.

$$\log\left(\frac{1}{K_{af}}\right) = 1,78 + 1,42 \times 10^{-5} Re_\theta + 1,6 \log Re_g \quad (2.4)$$

No desenvolvimento da correlação foram desprezados os efeitos do aumento da energia cinética rotacional ( $\Delta P_K$ ). Os valores de queda de pressão, preditos pela correlação desenvolvida por Kumar e Rao (1990), apresentaram um desvio de  $\pm 20 \%$  em relação aos valores medidos experimentalmente.

Sing e colaboradores (1992) avaliaram as características hidrodinâmicas de 3 leitos de tamanhos diferentes. Os leitos tinham raio interno e altura axial de 12,7 cm, entretanto, o raio externo correspondia à 22,9 cm, 30,5 cm, e 38,1 cm respectivamente. Cada rotor foi avaliado operando com 2 tipos de recheio, o primeiro deles era uma espécie de uma esponja metálica composta de 85 % de níquel e 15 % de cromo, com área superficial específica de 2500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> e porosidade 0,95; o segundo era uma tela metálica com área superficial específica 2067 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> e porosidade 0,934.

Das análises experimentais observou-se que a queda de pressão foi função do raio do rotor, uma vez que, operando sob as mesmas condições de escoamento, a queda de pressão foi maior para o rotor de raio 38,1 cm. Também foi verificada a variação da queda de pressão com a vazão da fase gasosa, sendo que foram obtidos baixos valores de queda de pressão para vazões menores e altos valores para vazões mais elevadas.

Os dados experimentais foram comparados aos valores de inundação previstos pela correlação de Sherwood, e pode ser verificado que a correlação predizia parâmetros de operação

de inundação acima dos valores observados experimentalmente, sobrestimando a capacidade hidrodinâmica do equipamento.

Uma modelagem semi-teórica baseada em observações experimentais foi realizada. Os pesquisadores consideraram que a queda de pressão no recheio pode ser modelada como uma soma da queda de pressão rotacional e da queda de pressão por atrito. Destas análises teóricas foi desenvolvida a equação 2.5, sendo que o primeiro termo da equação representa a queda de pressão rotacional e o segundo termo a queda de pressão por atrito.

$$P_{total} = A \frac{\rho_{ar} w^2}{2} (r_2^2 - r_1^2) + B \frac{a_p}{\varepsilon} \rho_{ar} (r_2 - r_1) U_{g\text{ média}}^2 \quad (2.5)$$

$$U_{g\text{ média}} = \frac{I}{(r_2 - r_1)} \int_{r_1}^{r_2} V dr \quad (2.6)$$

Para os rotores de 22,9 cm e 38,1 cm de raio externo foram obtidos os valores 0,92 e 0,99 para as constantes empíricas “A” e “B” da equação 2.5. Para os leitos analisados por Singh e colaboradores a equação proposta estimou a queda de pressão com um desvio de  $\pm 30 \%$  em relação aos dados experimentais.

Lockett (1995) realizou estudos hidrodinâmicos de um rotor contendo recheio estruturado (Flexipac) de alta densidade. Nestes estudos o comportamento hidrodinâmico previsto por Keyani (1989) não foi verificado, pois, a queda de pressão foi função das taxas de escoamento das fases gasosa e líquida, tendência similar ao que ocorre nas colunas convencionais. Foi observado que a inundação começava com o acúmulo de líquido no centro do rotor, local onde a área de escoamento é mínima e as forças centrífugas também são menores. A queda de pressão medida no ponto de inundação correspondia a 15 vezes o valor observado deste parâmetro em um equipamento convencional, fato que explica a alta capacidade hidráulica do equipamento centrífugo.



A equação de Wallis (1969) que prediz a inundação no escoamento bifásico contracorrente em tubos foi utilizada como base para o desenvolvimento de uma equação de inundação para leitos centrífugos. Para o recheio estruturado Flexipac a equação 2.7 prediz a inundação para uma faixa de taxas de escoamento e aceleração centrífuga.

$$C_G^{0,5} + mC_L^{0,5} = 1,57 a_p^{-0,25} N_g^{0,25} \mu^{-0,03} \quad (2.7)$$

Baseado em estudos relacionados ao escoamento em leitos de recheio encontrados na literatura, Locket (1995) propôs as equações 2.8 à 2.11 para o cálculo dos parâmetros da equação 2.7.

$$C_G = U_G \left[ \frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right]^{0,5} \quad (2.8)$$

$$C_L = U_L \left[ \frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_G} \right]^{0,5} \quad (2.9)$$

$$N_g = \frac{w^2 r}{g} \quad (2.10)$$

$$m = 0,78 \exp(0,00058 a_p) \quad (2.11)$$

Os pontos de inundação foram obtidos operando o leito centrífugo com sistema água-ar em condições ambientes. Os efeitos da aceleração e da área superficial específica do recheio na inundação preditos pela equação 2.7 foram confirmados por meio dos dados experimentais.

Em 1996, Liu e colaboradores realizaram estudos das características operacionais de um leito centrífugo de 2 cm de altura axial, raio interno 4,5 cm e raio externo 7 cm. A queda de pressão foi investigada e correlacionada por meio de um modelo de escoamento gravitacional modificado para o escoamento centrífugo.

Foram avaliados os efeitos de 2 espécie de recheio na queda de pressão, sendo o primeiro de forma retangular ( $5 \times 5 \times 2,8$ ) mm<sup>3</sup>, área superficial específica 524 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> e porosidade 0,533; o último era de forma cilíndrica elíptica ( $3 \times 2,6 \times 3$ ) mm<sup>3</sup> com área superficial específica 1027 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> e porosidade 0,389. O leito foi operado com velocidade de rotação entre 400 e 2500 rpm, o que fornecia uma força centrífuga equivalente entre 10 – 402 vezes a força gravitacional. A queda de pressão da fase gasosa foi medida em condições ambientes operando o leito de recheio em uma faixa ampla de taxas de escoamento das fases gasosa e líquida com o sistema água-ar.

Nas análises do leito com enchimento de recheio retangular, sem a presença de líquido (leito seco), foi observada a dependência linear da queda de pressão com a velocidade de rotação para diferentes taxas de escoamento da fase gasosa. Nos experimentos com a presença das duas fases, leito molhado, observou-se que a queda de pressão, para o recheio retangular, operando à velocidade de rotação de até 1295 rpm era maior que a obtida para o leito seco; entretanto, para velocidades de rotação maiores a queda de pressão ficava constante e, para baixas vazões de líquido, ela chegou a ser menor que o valor correspondente ao leito seco, tendência bem diferente da observada nos leitos convencionais verticais, fato que já havia sido observado por Keyane (1989).

As análises hidrodinâmicas com o recheio elíptico cilíndrico não apresentaram dependência significativa da queda de pressão com a velocidade de rotação e vazão da fase líquida. Para os dois recheios analisados observou-se a forte dependência da queda de pressão com a vazão da fase gasosa.

Para correlacionar a queda de pressão do leito de recheio centrífugo Liu e colaboradores (1996) fizeram uso da equação 2.12, proposta por Billet e Schultes (1991), que havia sido utilizada primeiramente para leitos convencionais.

$$\Delta P_d = \frac{1}{2} F_V^2 \frac{a_p}{\varepsilon^3} f_d (r_2 - r_1) \quad (2.12)$$

A equação 2.12 foi então proposta para o leito seco, sendo que o fator ( $F_V$ ) foi definido como o produto da velocidade média da fase gasosa e a raiz quadrada da densidade do gás. O coeficiente ( $f_d$ ) foi assumido como função da taxa de escoamento da fase gasosa e velocidade do rotor, sendo que este fator foi determinado para cada espécie de recheio por meio de dados experimentais e, correlacionado em função do número de Reynolds da fase gasosa ( $4.R_h.U_g.\rho_g/\mu_g$ ) e do número de Reynolds rotacional ( $w.r_{\text{médio}}^2.\rho_g/\mu_g$ ). Para o recheio retangular foi obtida a equação 2.13 e para o elíptico cilíndrico foi encontrada a equação 2.14.

$$f_d = 7,786 \text{Re}_{Gp}^{1,404} + 10582 \text{Re}_{Gp}^{-0,776} + 3,233.10^{-3} \text{Re}_{Gp}^{-1,519} \text{Re}_w^{1,637} \quad (2.13)$$

$$f_d = 19,14 \text{Re}_{Gp}^{1,092} + 1529 \text{Re}_{Gp}^{-1,016} + 1,227.10^{-4} \text{Re}_{Gp}^{-1,618} \text{Re}_w^{1,605} \quad (2.14)$$

Em relação ao leito molhado, a equação (2.12) foi modificada considerando que a retenção da fase líquida “ $h_L$ ” acarretaria na diminuição da porosidade do leito, e assim, o fator “ $\varepsilon$ ” foi substituído por “ $(\varepsilon - h_L)$ ”, e o fator “ $f_d$ ” por “ $f_w$ ”, que era função do número de Reynolds da fase líquida ( $4.R_h.U_l.\rho_l/\mu_l$ ). A queda de pressão “ $\Delta P_w$ ” para o leito molhado foi estimada então através da equação 2.15. Devido a alta velocidade de rotação os pesquisadores consideraram que a retenção de líquido podia ser desprezada.

$$\Delta P_w = \frac{1}{2} F_V^2 \frac{a_p}{(\varepsilon - h_L)^3} f_w (r_2 - r_1) \quad (2.15)$$

$$f_w = 2,928 \times 10^{12} Re_{Gp}^{-1,409} Re_{Lp}^{0,596} Re_w^{-1,844} + 1518 \quad p/ Re_w < 2,29.10^4 \quad (2.16)$$

$$f_w = 7142 Re_{Gp}^{-2,044} Re_{Lp}^{0,22} Re_w^{0,243} + 2085 \quad p/ Re_w > 2,29.10^4 \quad (2.17)$$

Da análise das medidas de queda de pressão obtidas experimentalmente operando com o leito molhado, foram correlacionadas as equações 2.16 e 2.17 para o recheio retangular e a equação 2.18 para o recheio elíptico cilíndrico.

$$f_w = 72,93 Re_{Gp}^{-1,143} Re_{Lp}^{0,042} Re_w^{0,32} + 97,84 Re_{Gp}^{0,536} \quad (2.18)$$

As correlações empíricas propostas apresentaram estimativas de queda de pressão com desvios de  $\pm 20\%$  em relação aos valores medidos experimentalmente. Os desvios nas estimativas em relação ao leito molhado foram atribuídos ao fato do desconhecimento da retenção do líquido " $h_L$ ".

### 2.2.2 – Hidrodinâmica de Torres Convencionais.

Em torres de recheio alimentadas com uma determinada vazão mínima de líquido, existe um limite para a vazão da fase gasosa. A velocidade do gás para este limite é denominada velocidade de inundação, e ao ser atingida torna o equipamento inoperável. A velocidade de inundação pode ser determinada por observações da queda de pressão no leito em função da velocidade do gás ou por meio da visualização da retenção de líquido na coluna.

A queda de pressão observada, operando o leito na ausência de líquido, é linearmente proporcional à vazão de gás como mostra a Figura 2.4, Coulson (1968). Se a torre é alimentada com uma baixíssima vazão de líquido, o chamado líquido escorrido, o comportamento é análogo ao leito seco. A medida que é aumentada a alimentação de líquido, a retenção desta corrente

diminui a porosidade do leito aumentando a velocidade da fase gasosa. Para uma determinada vazão de líquido, a queda de pressão aumenta proporcionalmente ao aumento da velocidade do gás até o limite de inundação, neste ponto, o gás impede o líquido de escoar pela torre e o topo do recheio apresenta uma camada de líquido que vai aumentando até ser arrastada pela fase gasosa saindo no topo da coluna.

Os métodos de predição de queda de pressão em leitos de recheio, constituem-se, em grande parte, de correlações generalizadas de queda de pressão apresentadas geralmente na forma de gráficos.

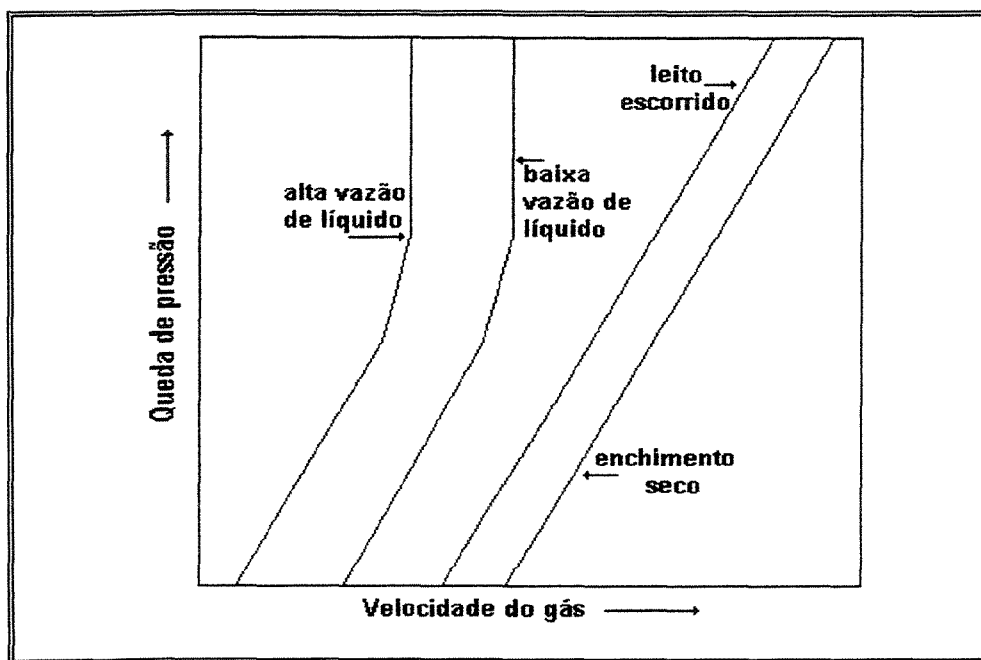


Figura 2.4: Queda de Pressão em Leitos de Recheio.

Foi proposta por Walker e colaboradores (1937) a primeira correlação de queda de pressão para leitos de recheios compostos basicamente por anéis de Raschig, que era o recheio disponível na época.

A mais conhecida correlação foi proposta por Sherwood e colaboradores (1938), e a determinação da velocidade de inundação se baseava em observações visuais do acúmulo de líquido no topo da coluna. A correlação foi determinada através de dados experimentais operando

a coluna com um sistema água-ar e diferentes espécies de recheio, sendo o recheio caracterizado na correlação pelo fator ( $a_P / \epsilon^2$ ).

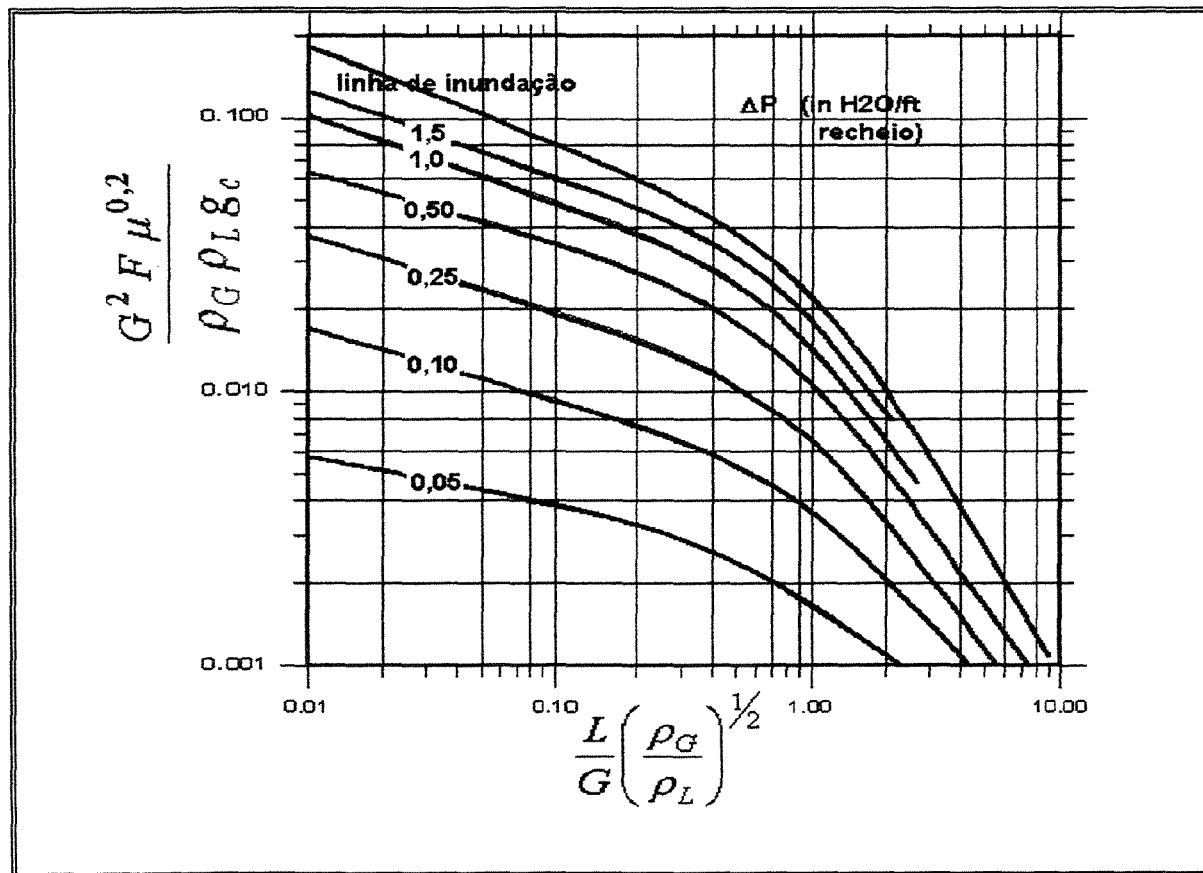


Figura 2.5 – Correlação de Queda de Pressão de Eckert (1970).

Eckert (1970) apresentou uma correlação que caracterizava o recheio por um fator denominado "Fp", que veio substituir o fator ( $a_P / \epsilon^2$ ) da correlação de Sherwood. Este fator foi determinado experimentalmente para uma série de recheios. Esta correlação, com representação gráfica apresentada na Figura (2.5), apresentou curvas de queda de pressão constantes, possibilitando o dimensionamento do leito para uma queda de pressão pré-estabelecida, além da curva de inundação. Esta correlação é ainda hoje muito utilizada no dimensionamento de leitos de recheio.

Estudos do comportamento de queda de pressão encontram-se publicados na literatura. Podem ser citados os métodos de Niranjani (1983), Billet e Mackowiak (1984), entre outros. Como critério de projeto para torres de recheio, Perry (1984), é recomendada a utilização de vazões de gás entre 50 e 70 % da vazão prevista de inundação. Em relação a queda de pressão, é recomendado que os leitos sejam projetados para operar entre 21 e 41 mmH<sub>2</sub>O/m de recheio em operações de absorção/dessorção, Caldas (1988), abaixo do limite inferior a eficiência de separação torna-se muito baixa, e acima do limite superior a faixa de operação é muito próxima a inundação.

### 2.3 – Fundamentos de Transferência de Massa

A maioria das operações de transferência de massa são baseadas na transferência de componentes entre duas fases insolúveis. Nestes sistemas ocorre o mecanismo da difusão molecular tanto no seio das fases como na fronteira que as separa, que é denominada interface.

Quando duas fases são colocadas em contato ocorre o estabelecimento de uma relação de equilíbrio entre elas. Para condições fixas de temperatura e pressão existe uma única relação de equilíbrio entre as fases presentes no sistema. Caso o sistema esteja em equilíbrio não ocorre difusão líquida de componentes entre as fases, entretanto, se o sistema não estiver em equilíbrio ocorrerá a difusão de componentes entre as fases até que o sistema alcance as condições de equilíbrio termodinâmico.

A teoria dos dois filmes de Whitman constitui-se no conceito mais utilizado nos estudos dos processos de dessorção/absorção. Segundo esta teoria, os componentes são transportados no seio das fases por correntes de convecção, e as diferenças de concentração são consideradas desprezíveis, exceto em uma camada fina na vizinhança da interface entre as fases.

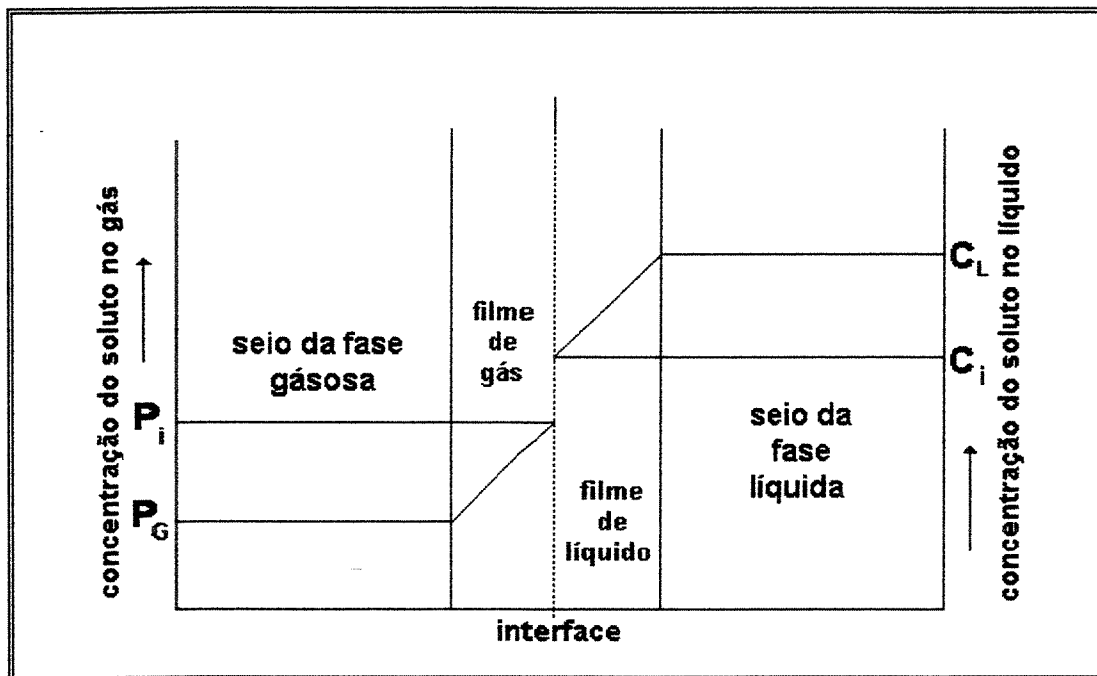


Figura 2.6 – Perfil de Concentração para Dessorção.

De cada um dos lados da interface existe um filme fino de fluido e através desse filme a transferência de massa é realizada por meio da difusão molecular, como mostra a Figura 2.6. Devido a essa transferência ocorre a formação de um gradiente de concentração através da interface, e é assumido que não existe resistência a transferência na interface, onde existem condições de equilíbrio. O fator controlador é a velocidade de difusão através dos filmes onde se considera que reside toda a resistência. A teoria de Whitman pode, então, ser resumida pelas suposições de que as concentrações na interface estão em equilíbrio e a resistência à transferência centra-se nos filmes finos de ambos os lados da interface.

Para sistemas em que as concentrações do soluto nas fases gasosa e líquida são diluídas, a taxa de transferência pode ser expressa pelas equações 2.19 e 2.20 que predizem que a taxa de transferência de massa é proporcional a diferença de concentração entre o seio da fase e a interface gás-líquido.



$$N_A = k'_G (P_i - P) \quad (2.19)$$

$$N_A = k'_L (C - C_i) \quad (2.20)$$

Os coeficientes de transferência de massa  $k'_G$  e  $k'_L$  são iguais a razão do fluxo de massa molar  $N_A$  com as forças motoras  $(P_i - P)$  e  $(C - C_i)$ , respectivamente. Analogamente, podem ser desenvolvidas as equações 2.21 e 2.22 que relacionam o fluxo de transferência as frações molares das fases presentes no sistema.

$$N_A = k_G (y_i - y) \quad (2.21)$$

$$N_A = k_L (x - x_i) \quad (2.22)$$

Os coeficientes de transferência de massa, definidos nas equações 2.19 à 2.22, relacionam-se entre si, como mostram as equações 2.23 e 2.24, tomando como referência a pressão total da fase gasosa  $P_T$  e a densidade molar da fase líquida  $\rho_{ML}$ .

$$k_G = k'_G P_T \quad (2.23)$$

$$k_L = k'_L \rho_{ML} \quad (2.24)$$

Através da combinação das equações 2.19 à 2.24 obtêm-se a equação 2.25, que pode ser usada na determinação da concentração interfacial correspondente a um conjunto de valores  $x$  e  $y$ , desde que sejam conhecidos os valores dos coeficientes individuais de transferência de massa.

$$\frac{(y_i - y)}{(x - x_i)} = \frac{k_L}{k_G} = \frac{k'_L \rho_{ML}}{k'_G P_T} \quad (2.25)$$

No projeto dos equipamentos para dessorção é necessário estimar as taxas de transferência de massa por meio de coeficientes conhecidos ou preditos juntamente com as concentrações nas fases. Esta tarefa pode ser realizada pela resolução das equações 2.25, 2.21, 2.22, simultaneamente com a relação de equilíbrio  $y_i^0 = F(x_i)$ .

Se a relação  $y_i^0 = F(x_i)$  é linear, a taxa de transferência é proporcional a diferença entre a concentração na fase e a concentração que poderia estar em equilíbrio com a composição do componente na segunda fase. As forças motoras serão  $(y^0 - y)$  e  $(x - x^0)$ , tornando desnecessário o trabalho de determinar as composições na interface. A taxa de transferência de massa pode então ser definida pela equação 2.26, onde  $y^0$  corresponde a composição na fase gasosa em equilíbrio com a fração molar na fase líquida, e  $x^0$ , a composição na fase líquida em equilíbrio com a composição do componente na fase gasosa.

$$N_A = K_G(y^0 - y) = K_L(x - x^0) \quad (2.26)$$

Combinando as equações 2.26, 2.21 e 2.22 são determinadas as expressões que permitem o cálculo dos coeficientes globais de transferência de massa em função dos coeficientes individuais das fases líquida e gasosa, o que explica o nome teoria dos dois filmes, que é definida pelas equações 2.27 e 2.28.

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L} \quad (2.27)$$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{H k_G} \quad (2.28)$$

Em várias espécies de equipamentos de dessorção/absorção, tais como leitos de recheio, a área interfacial, que é efetiva para a transferência de massa, não pode ser determinada com precisão. Por esta razão é mais indicado descrever as taxas de transferência observadas experimentalmente em termos de coeficientes baseados no volume do equipamento, do que em unidades de área interfacial. Os coeficientes de transferência volumétricos são definidos como  $K_L a$  e  $K_G a$ , sendo que o parâmetro  $a$  representa a razão entre a área interfacial e o volume do recheio utilizado no equipamento. Então as equações 2.27 e 2.28 são reformuladas para os coeficientes globais volumétricos resultando nas equações 2.29 e 2.30.

$$\frac{1}{K_G a} = \frac{1}{k_G a} + \frac{H}{k_L a} \quad (2.29)$$

$$\frac{1}{K_L a} = \frac{1}{k_L a} + \frac{1}{H k_G a} \quad (2.30)$$

Na literatura encontram-se publicados uma grande quantidade de trabalhos experimentais que relatam coeficientes globais de transferência de massa para a maioria dos sistemas utilizados industrialmente. Em alguns destes trabalhos são propostas correlações empíricas para predição dos coeficientes de transferência para uma série de equipamentos de contato gás-líquido, e, pode ser citada como exemplo as correlações de Onda (1959) para torres de recheio convencionais.

#### 2.4 – Transferência de Massa em Leitos Centrífugos.

A influência da força gravitacional na transferência de massa foi estudada primeiramente por Vivian e colaboradores (1965), as análises basearam-se em experimentos de dessorção de dióxido de carbono da água realizados em uma coluna de recheio montada em uma grande centrífuga. A velocidade de rotação proporcionou a obtenção de um campo centrífugo que variava entre 1 e 6,4 vezes a força gravitacional.

Os resultados mostraram que o coeficiente de transferência de massa para o filme líquido  $k_L a$  variava com a gravidade na potência 0,41 – 0,48, e o efeito da gravidade aumentava com a redução da taxa de escoamento da fase líquida. Os pesquisadores concluíram que a aceleração centrífuga proporciona o aumento da área interfacial específica de contato entre as fases resultando no aumento expressivo da transferência de massa em relação ao equipamento convencional (leito estático).

A unidade “HIGEE”, Ramshaw (1983), descrita na seção 2.2.1, foi testada em operações de destilação. O sistema era composto por dois rotores sendo que a alimentação do sistema era realizada entre os equipamentos. Nos experimentos laboratoriais foram utilizados rotores com diâmetro externo de 19 cm e diâmetro interno de 16,5 a 17,8 cm. As análises foram realizadas operando em regime de refluxo total. Para os sistemas destilantes testados, a altura de um prato teórico (HETP) medida foi na faixa de 10 – 20 mm, operando a uma aceleração centrífuga média de  $10^4 \text{ m/s}^2$ .

Foram executados testes em equipamentos em escala comercial. Foi construído um rotor com 80,0 cm de diâmetro que operava a uma taxa de 3 toneladas/hora de uma mistura etanol-propanol em regime de refluxo total. O equipamento comercial apresentou características análogas ao laboratorial acumulando milhares de horas de serviço sem apresentar problemas, entretanto, dados quantitativos não foram publicados. Das análises experimentais, foi verificado o elevado benefício da aceleração centrífuga para as operações de destilação, e foi sugerida a utilização do equipamento para operações tais como absorção e extração líquido-líquido. A unidade HIGEE proporcionou a obtenção da intensificação de processos proposta por seus idealizadores.

Tung e Mah (1985) aplicaram a teoria da penetração no desenvolvimento da correlação 2.31, os coeficientes de transferência de massa estimados pela equação foram comparados aos valores experimentais medidos por Ramshaw (1983). A teoria da penetração predizia o coeficiente  $k_L$  com desvio de  $\pm 25 \%$ , fato que segundo os pesquisadores mostrava a ineficiência da teoria na predição do efeito da aceleração centrífuga.

$$k_L = 0,918 \frac{D_L}{d_p} \left( \frac{a_p}{a} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_L}{D_L \rho_L} \right)^{1/2} \left( \frac{L}{a \mu_L} \right)^{1/3} \left( \frac{d_p^3 \rho_L^2 g}{\mu_L^2} \right)^{1/6} \quad (2.31)$$

Estudos de transferência de massa em um leito centrífugo composto por enchimento de recheio do tipo wire mesh foram publicados por Kumar e Rao (1990). Experimentos de absorção de dióxido de carbono em uma solução de hidróxido de sódio foram realizados visando a obtenção da área interfacial e dos coeficientes de transferência de massa para o filme líquido.

Os coeficientes  $k_L a$  foram determinados por meio da taxa de absorção baseada no volume de recheio no rotor. Os valores obtidos experimentalmente foram comparados aos estimados pela correlação de Tung e Mah (1985), equação 2.31, e apresentaram boa concordância. Os coeficientes obtidos para o leito centrífugo corresponderam a aproximadamente 2 vezes os valores encontrados em leitos convencionais.

Os efeitos dos parâmetros operacionais, tais como velocidade de rotação e área superficial do recheio, na altura da unidade de transferência (HTU), foram estudados por Keyane (1989). Foram realizados experimentos de dessorção com um sistema ar-água-dióxido de carbono em um leito de recheio na forma de uma esponja metálica.

Nos estudos de transferência de massa foi encontrada a altura média da unidade de transferência (HTU) entre 1,5 e 4,0 cm. A dependência da HTU com a aceleração centrífuga variou de -0,30 a -0,40. O coeficiente volumétrico de transferência de massa aumentava com a velocidade de rotação na potência 0,6 – 0,7. Foi detectado que o efeito da aceleração na altura da unidade de transferência é mais pronunciado para o recheio de maior área superficial. A HTU não apresentou nenhuma variação com as taxas de escoamento gás-líquido dentro da faixa estuda,

entretanto, os pesquisadores concluíram que o modelo de escoamento, a hidrodinâmica do gás e do líquido no leito centrífugo, a distribuição dos fluidos e a forma do recheio podem todos influenciar as características de transferência de massa do equipamento.

Além da transferência de massa, foram realizados estudos a respeito da potência requisitada na rotação e o tempo de residência da fase líquida no leito centrífugo. Para o sistema estudado, a potência ficou abaixo de 2 hp, e o tempo de residência médio variava entre 0,4 e 1,8 segundos, sendo que com o aumento da velocidade de rotação ocorria a redução do tempo de residência no leito de recheio. Foi sugerido que devido ao curto tempo de residência das fases no equipamento, este poderia ser utilizado em processos de absorção seletiva ou em reações exotérmicas onde os produtos são sensíveis ao calor.

O leito centrífugo foi utilizado na remoção de componentes voláteis de água subterrânea, Singh e colaboradores (1992). Foram avaliados 3 rotores com raio interno e altura axial de 12,7 cm e raio externo de 22,9; 30,5 e 38,1 cm respectivamente. Foram testados dois tipos de recheio, sendo o primeiro na forma de uma esponja metálica com porosidade 0,95 e área superficial 2500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, e o segundo na forma de uma tela metálica com área superficial 2067 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> e porosidade 0,934. Foi proposta a equação 2.32 para o dimensionamento de um leito centrífugo derivada do conceito de unidade de transferência baseada em coordenadas cilíndricas, a qual assumia que a principal resistência a transferência localizava-se na fase líquida.

$$\frac{Q}{z K_L a} \frac{\ln \left[ \left[ \frac{x_1 - y_2 / H_c}{x_2 - y_2 / H_c} \right] (1 - 1/S) + (1/S) \right]}{(1 - 1/S)} = \pi (r_2^2 - r_1^2) \quad (2.32)$$

$$S = \frac{H_c G}{L} \quad (2.33)$$

Analisando a equação observa-se que o lado direito  $\pi(r_2^2 - r_1^2)$  tem unidades de área, e devido a este fato o primeiro termo do lado esquerdo ( $q/l.K_L a$ ) foi definido por Singh como ATU,

área de uma unidade de transferência, em analogia ao parâmetro HTU utilizado no projeto de torres convencionais. O restante do lado esquerdo da equação representa o número de unidades de transferência NTU, que é o mesmo para as torres convencionais e os leitos centrífugos.

Da avaliação dos dados experimentais foi observado que a área de uma unidade de transferência diminui com o aumento da velocidade de rotação para os dois tipos de recheio. Também foi notado que a ATU aumentava proporcionalmente ao aumento do raio externo do rotor, sendo esta tendência mais expressiva a baixas velocidades de rotação.

Foi desenvolvida a equação 2.34 para predição da ATU baseada na suposição de que taxa de transferência é controlada pelo filme líquido, e a ATU foi assumida como função das variáveis: densidade, viscosidade e taxas de escoamento da fase líquida, área superficial específica do recheio e aceleração centrífuga.

$$ATU = \left( \frac{3,4 \times 10^4}{a_p^2} \right) \left( \frac{L}{\mu_L a_p} \right)^{0,6} \left( \frac{\rho_L^2 g}{\mu_L^2 / a_p^3} \right)^{-0,15} \quad (2.34)$$

A equação foi determinada em função dos números de Reynolds e Grashoff que são baseados na área superficial específica do recheio. O ATU estimado pela equação foi comparado aos valores experimentais, e foram observados desvios de  $\pm 20\%$ . Esta correlação seria mais completa se tivesse incluído em seus parâmetros o número de Schmidt, Singh (1992) justificou esta deficiência pelo fato de que nos experimentos este parâmetro permaneceu constante, aproximadamente 1400, e por isso não foi incluído.

A potência consumida na rotação do leito centrífugo foi modelada em função das perdas por atrito e da energia requisitada para acelerar o líquido desde a entrada do leito até o raio externo do rotor onde a velocidade é maior, como mostra a equação 2.35. O consumo de energia em relação ao atrito é altamente dependente do equipamento e não pode ser predito sem conhecer as características físicas deste. O consumo de potência consumido para acelerar o líquido foi descrito pelo método teórico de Leonard (1980).

$$P_c = Z_0 + Z_1 \rho_L r_2^2 w^2 Q \quad (2.35)$$

Para os experimentos realizados, os coeficientes de correlação  $Z_0$  e  $Z_1$  corresponderam aos valores 1,2 e  $1,1 \cdot 10^{-3}$  respectivamente. O coeficiente de correlação obtido para a equação 2.35, em relação aos dados experimentais, foi 0,92. Singh e colaboradores (1992) concluíram que a potência consumida pelo leito era função principalmente da taxa de escoamento da fase líquida, raio externo do rotor e velocidade de rotação.

As características de transferência de massa de um leito de recheio centrífugo foram investigadas por Liu e colaboradores (1996). O leito analisado era constituído de um rotor de 2,0 cm de altura axial, 4,5 cm de raio interno e 7,0 cm de raio externo. A separação foi avaliada para dois tipos de recheio, o primeiro tinha forma retangular  $(5 \times 5 \times 2,8) \text{ mm}^3$  com área superficial específica de  $524 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e porosidade 0,533; o segundo era de forma elíptica cilíndrica  $(3 \times 2,6 \times 3) \text{ mm}^3$  com área superficial específica  $1027 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e porosidade 0,389. A faixa de rotação testada foi de 400 a 2500 rpm que é equivalente a 10 - 402 vezes a força gravitacional.

Foram realizados experimentos de dessorção de etanol de uma solução etanol-água através de uma corrente gasosa. Os coeficientes globais volumétricos de transferência de massa ( $K_G a$ ) foram determinados experimentalmente para uma faixa de escoamento da fase líquida de 1,3 à  $3,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$  e da fase gasosa entre 0,03 e  $0,08 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ .

Visando o projeto de uma unidade centrífuga foi desenvolvida a equação 2.36, que foi baseada na transferência na fase gasosa, balanço de massa global e no conceito de unidade de transferência.

$$\frac{G}{z K_G a P_t} \frac{\ln \left[ \left[ \frac{y_1 - H_c x_2}{y_2 - H_c x_2} \right] (1 - S) + S \right]}{(S - 1)} = \pi (r_2^2 - r_1^2) \quad (2.36)$$



Para todos os recheios analisados o coeficiente  $K_{Ga}$  apresentou dependência linear em relação à velocidade de rotação em toda a faixa operacional analisada. Para o recheio elíptico cilíndrico verificou-se que operando o equipamento a uma vazão fixa de gás e diferentes taxas de escoamento da fase líquida, os coeficientes de transferência de massa obtidos foram praticamente os mesmos, diferente do ocorrido com o recheio retangular que apresentou valores mais altos deste parâmetro para altas vazões da fase líquida, que foi justificado pelo fato do recheio cilíndrico apresentar menor retenção de líquido no leito e conseqüentemente menor área interfacial gás-líquido.

Operando a uma taxa fixa de escoamento da fase líquida verificou-se que o efeito da velocidade de rotação no  $K_{Ga}$ , em relação ao recheio retangular, foi mais pronunciado quando o leito era operado com altas vazões de gás. Para o recheio cilíndrico o efeito da velocidade de rotação foi o mesmo para as taxas de escoamento da fase gasosa analisadas. Além disso, o recheio retangular apresentou maiores taxas de transferência, o que sugere que este recheio apresentou um contato mais efetivo entre as fases.

Foi investigada a variação do  $K_{Ga}$  com a vazão da fase gasosa, operando a taxa de escoamento da fase líquida e velocidade de rotação fixas. Para o recheio retangular foi verificado que o coeficiente aumentava fortemente com o aumento da vazão de gás, entretanto, para o outro recheio o efeito da vazão de gás não foi tão pronunciada, fenômeno que foi relacionado à boa distribuição da fase gasosa para o recheio retangular.

Os pesquisadores compararam os valores de  $K_{Ga}$  obtidos para o leito centrífugo com as medidas experimentais realizadas em um leito convencional publicadas por Houston e Walker (1950). Os coeficientes medidos para o leito centrífugo, operando com baixas vazões de gás, foram bem maiores do que os obtidos para o equipamento convencional operando altas vazões de gás, demonstrando o alto rendimento do leito centrífugo em relação ao convencional.

Na predição dos coeficientes globais volumétricos de transferência de massa, Liu e Colaboradores (1996) utilizaram a teoria dos dois filmes expressa pela equação 2.30. O coeficiente de transferência de massa do filme líquido foi estimado pela equação 2.31 proposta por Tung e Mah (1985), o coeficiente de transferência para o filme gasoso foi estimado pela correlação 2.37 desenvolvida por Onda e colaboradores (1968), ou pela correlação 2.38 proposta por Shulman e colaboradores (1995).

$$\frac{k_G}{a_p D_G} = 5,23 \left( \frac{G}{a_p \mu_G} \right)^{0,7} \left( \frac{\mu_G}{\rho_G D_G} \right)^{1/3} (a_p d_p)^{-2} \quad (2.37)$$

$$\frac{k_G d_p}{D_G} = 1,045 (1 - \varepsilon)^{0,36} \left( \frac{G d_p}{\mu_G} \right)^{0,64} \left( \frac{\mu_G}{\rho_G D_G} \right)^{0,33} \quad (2.38)$$

A área interfacial gás líquida foi avaliada pelas correlações de Onda e colaboradores (1968), e de Puranik e Volgelpohl (1974), expressas pelas equações 2.39 e 2.40 respectivamente.

$$\frac{a}{a_p} = 1 - \exp \left( -1,45 \left( \frac{\sigma_C}{\sigma} \right)^{0,75} \left( \frac{L}{a_p \mu_L} \right)^{0,1} \left( \frac{L^2 a_p}{\rho_L g} \right)^{-0,05} \left( \frac{L^2}{\rho_L a_p \sigma} \right)^{0,2} \right) \quad (2.39)$$

$$\frac{a}{a_p} = 1,045 \left( \frac{L}{a_p \mu_L} \right)^{0,041} \left( \frac{L^2}{\rho_L a_p \sigma} \right)^{0,133} \left( \frac{\sigma}{\sigma_C} \right)^{-0,182} - 0,229 + 0,091 \ln \left( \frac{g}{\sigma a_p^2} \right) \quad (2.40)$$

A combinação das equações acima foi testada para o leito centrífugo e os valores estimados foram comparados aos valores obtidos experimentalmente, e verificou-se que esta metodologia subestima os coeficientes de transferência de massa, o que pode ser justificado pelo fato das estimativas para  $k_G$  não incluírem o efeito da força centrífuga. Devido ao fato das correlações existentes não possibilitarem a estimativa do  $K_G a$  para o leito centrífugo, Liu e Colaboradores (1996) desenvolveram a equação 2.41 que foi obtida da regressão dos dados experimentais, sendo que na elaboração da equação foi assumido o coeficiente  $K_G a$  como função dos parâmetros:

vazão, densidade, viscosidade das fases líquida e gasosa, área superficial específica do recheio, diâmetro do recheio e aceleração centrífuga.

$$\frac{K_G a R T}{D_G a_p^2} = 3,111 \times 10^{-3} \left( \frac{G}{a_p \mu_G} \right)^{1,163} \left( \frac{L}{a_p \mu_L} \right)^{0,631} \left( \frac{d_p^3 a_c \mu_G^2}{\rho_G^2} \right)^{0,25} \quad (2.41)$$

A equação 2.41 apresentou um desvio de  $\pm 30 \%$  em relação aos dados experimentais e o coeficiente  $K_G a$  foi função da força centrífuga na potência 0,25, que está dentro da faixa estimada por Ramshaw (1983).

## 2.5 – Transferência de Massa em Torres de Recheio Convencionais.

As torres de recheio são equipamentos relativamente comuns, que são utilizados em operações de contato gás-líquido, tais como absorção, dessorção, destilação. As primeiras citações da utilização de torres de recheio são de 1820, onde esferas de vidro foram usadas em alambiques de álcool.

A transferência de massa entre as fases é proporcionada pelo recheio no interior da torre, o qual mantém o contato contínuo entre as fases em toda a extensão do leito recheado. Na literatura, encontram-se publicados, grande quantidade de estudos e modelos, para o projeto de torres de recheio. Neste trabalho, serão citadas as equações necessárias ao dimensionamento de leitos de recheio convencionais, visando a comparação com as dimensões do equipamento centrífugo.

Os dois principais parâmetros que necessitam ser estimados no projeto de torres convencionais são a área de escoamento e a altura da coluna. O dimensionamento da área é baseado nas condições hidrodinâmicas da coluna, tendo como base a queda de pressão desejada, evitando que a coluna alcance condições de inundação. Na seção 2.2.2 do presente capítulo foram apresentadas correlações de queda de pressão para os leitos convencionais.

A altura da coluna, para operações de dessorção, é determinada em função do sistema (soluto-solvente), da taxa de transferência desejada e dos coeficientes de transferência de massa entre outros fatores.

Considerando o caso dos coeficientes globais de transferência, operando a coluna com baixas concentrações de soluto, o dimensionamento da altura pode ser realizado por meio das equações 2.42 e 2.43, Coulson (1968).

$$z = \frac{G_m}{K_G a} \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{dy}{Y^0 - Y} \quad (2.42)$$

$$z = \frac{L_m}{K_L a} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{X - X^0} \quad (2.43)$$

O dimensionamento da altura da coluna também pode ser realizado tomando como base o conceito de unidade de transferência, Treybal (1981), operando o sistema com soluções diluídas, sendo a altura da torre determinada pelo produto do número de unidades globais de transferência,  $N_{tOL}$ , e pela altura de uma unidade de transferência  $H_{tOL}$ , como mostra a equação 2.44.

$$z = N_{tOL} H_{tOL} \quad (2.44)$$

A altura da unidade global de transferência, equação 2.45, Coulson (1968), representa a medida da eficácia da separação relacionada ao desempenho do equipamento na realização da dessorção. O número de unidades globais de transferência, determinado pela equação 2.46, Treybal (1981), mede o grau de dificuldade de separação, relacionando a variação da composição com a força motora que impulsiona a transferência de massa.

$$H_{tOL} = \frac{L_m}{K_L a C_T} \quad (2.45)$$

$$N_{iOL} = \frac{\ln \left[ \frac{x_1 - y_2 / H_C}{x_2 - y_2 / H_C} (1 - A) + A \right]}{1 - A} \quad (2.46)$$

Os coeficientes globais de transferência de massa,  $K_L a$  e  $K_G a$ , podem ser obtidos através de dados experimentais encontrados na literatura ou por meio de correlações tais como as equações 2.47 a 2.49, que foram propostas por Onda, Perry (1973), as quais em conjunto com a teoria dos dois filmes, representada pelas equações 2.29 e 2.30, estimam os coeficientes de transferência com razoável precisão.

$$k_l \left( \frac{\rho_l}{\mu_l g} \right)^{1/3} = 0.0051 \left( \frac{L}{a \mu_l} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu_l}{\rho_l D_l} \right)^{-0.5} (a_t D_p)^{0.4} \quad (2.47)$$

$$\frac{a}{a_t} = 1 - \exp \left[ -1.45 \left( \frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{0.75} N_{Re}^{0.1} N_{Fr}^{-0.05} N_{We}^{0.2} \right] \quad (2.48)$$

$$\frac{k_g R T}{a_t D_g} = 2.00 \left( \frac{G}{a_t \mu_g} \right)^{0.7} \left( \frac{\mu_g}{\rho_g D_g} \right)^{1/3} (a_t D_p)^{-2.0} \quad (2.49)$$

# Capítulo 3:

# Equipamentos

# Materiais

# e Métodos

### 3. EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 – Equipamentos

Tendo-se como objetivo a determinação do comportamento hidrodinâmico e de transferência de massa em operações de dessorção sujeitas a um campo centrífugo, foi construído um leito de recheio que será descrito nesta seção.

O sistema experimental, apresentado resumidamente na Figura 3.1, consiste, basicamente de: leito de recheio centrífugo (1), motor (2), banho termostático para controle de temperatura da fase líquida (3), tanque de alimentação da fase líquida (4), bomba centrífuga (5), rotâmetros (6), válvulas (7), dispositivo de descarga da fase líquida (8), dispositivo de entrada da fase líquida (9), dispositivo de saída da fase gasosa (10), entrada da fase gasosa (11), saturador do ar (12), manômetro em U (13), linha de ar comprimido (14), freqüencímetro (15) e indicador de temperatura (16). Além destes, foi utilizado um espectrofotômetro na determinação da concentração da fase líquida. Os mecanismos de operação, bem como os detalhes mecânicos do sistema, serão discutidos posteriormente.

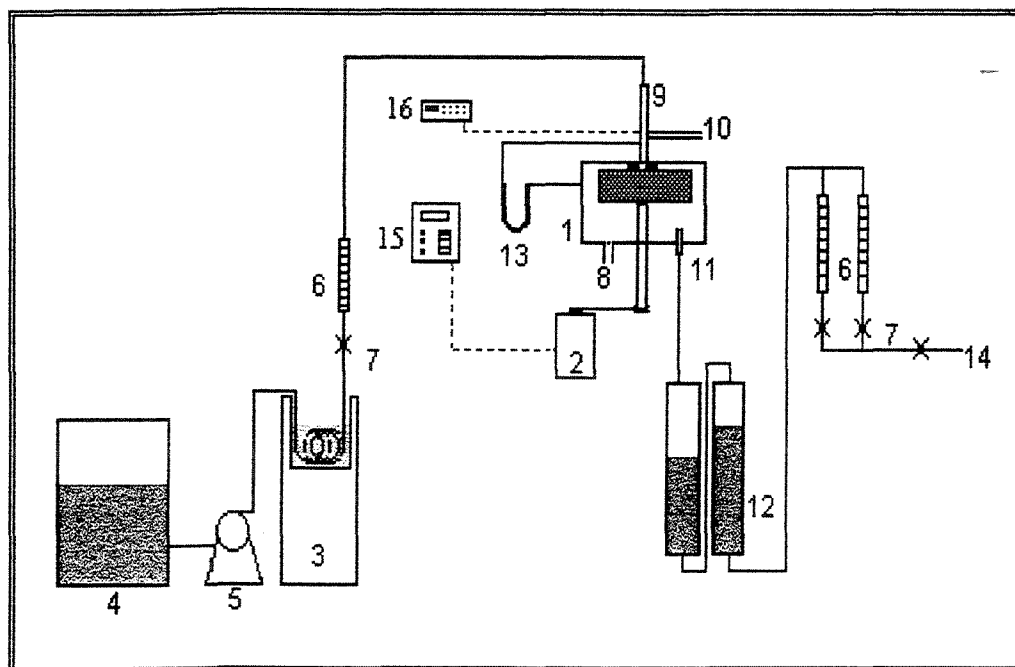


Figura 3.1: Sistema Experimental.

### 3.1.1 – Construção e Montagem do Equipamento Centrífugo

O leito centrífugo estudado neste trabalho, foi desenvolvido tomando-se como base a unidade “HIGEE”, Ramshaw (1983), com algumas alterações concernentes aos sistemas de injeção e distribuição da fase líquida.

A construção do rotor foi realizada a partir de dois discos de latão na forma de um setor circular, com diâmetro externo de 10,5 cm e diâmetro interno de 4 cm. Estes discos foram presos entre si por uma série de parafusos formando um sólido que pode ser identificado geometricamente como um cilindro chato, como é mostrado na Figura 3.2.

No centro do rotor, região que é denominada “olho” do rotor, fica localizado o sistema de distribuição da fase líquida, constituído por 7 lâminas em disposição helicoidal, que com a rotação distribuem uniformemente a fase líquida sobre o recheio.

O rotor é conectado em sua parte superior a um rolamento que o fixa à câmara estacionária, e na parte inferior é conectado a um eixo responsável pela rotação. Este eixo, recebe o impulso mecânico do motor por meio de uma correia conectada a uma polia em sua parte inferior.

A fase gasosa é alimentada na base da câmara estacionária e escoar de fora para dentro do rotor, movida por um gradiente de pressão, estabelecendo contato em contracorrente com a fase líquida. O material de enchimento fica contido no espaço entre os discos formando o leito de recheio onde ocorre a transferência de massa entre as fases.

Podem ser observados na Figura 3.2 detalhes mecânicos da construção e montagem do equipamento. O equipamento de contato foi extensivamente testado quanto aos aspectos de resistência mecânica e operabilidade antes do desenvolvimento deste trabalho de tese.



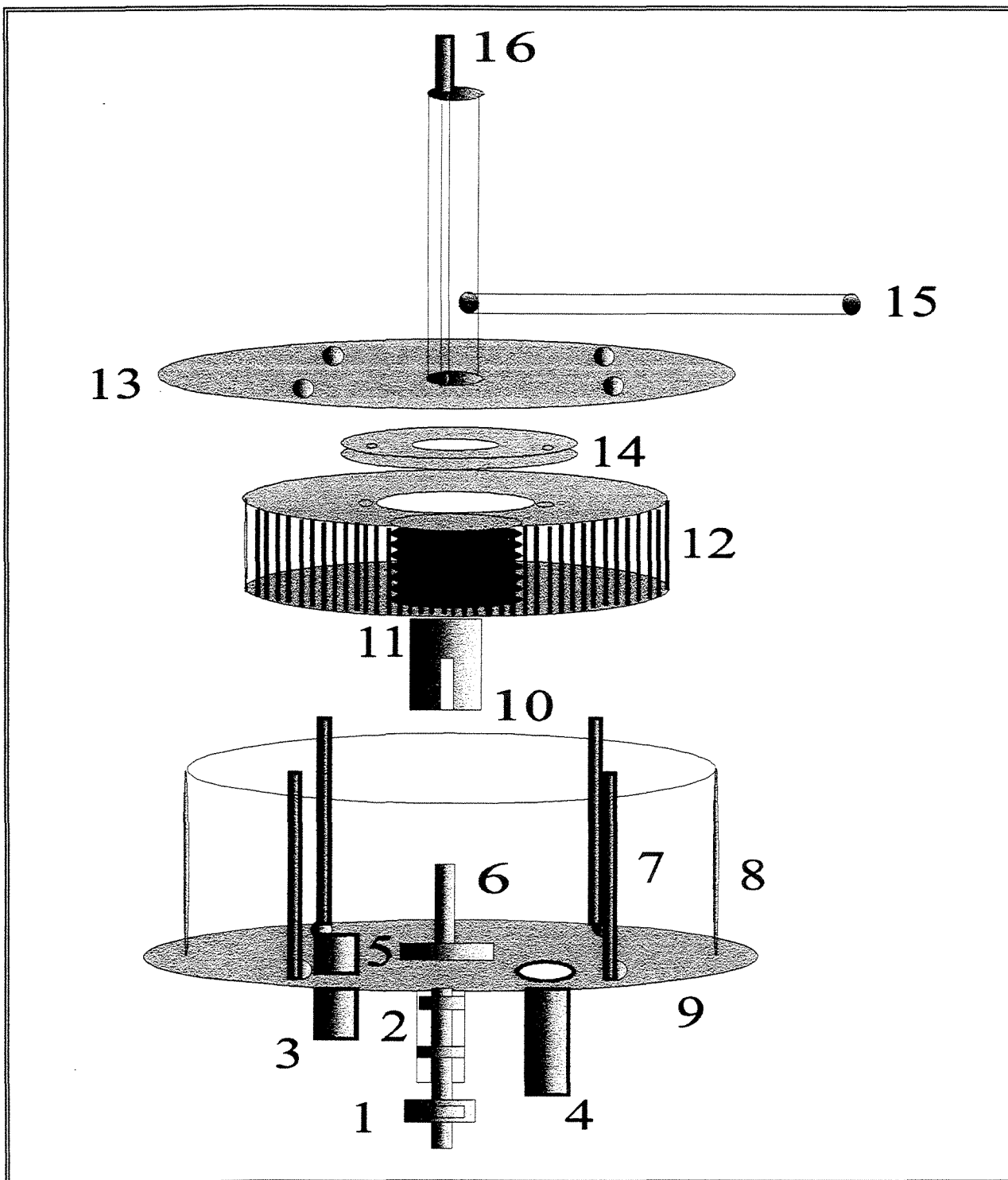


Figura 3.2: Detalhes Mecânicos do Equipamento Centrífugo.

As peças numeradas na Figura 3.2 correspondem à: (1) polia, (2) rolamentos, (3) entrada da fase gasosa, (4) saída da fase líquida, (5) selo mecânico, (6) eixo de transmissão, (7) parafusos de fixação, (8) vidro, (9) fundo da câmara, (10) engrenagem de transmissão, (11) distribuidor helicoidal de líquido, (12) leito de recheio, (13) topo equipamento, (14) rolamento e dispositivo de sustentação do rotor, (15) saída da fase gasosa, (16) entrada da fase líquida.

### 3.1.2 – Sistema de Alimentação e Distribuição da Fase Líquida

A alimentação da fase líquida realizou-se por meio de uma bomba centrífuga, marca KSW, modelo Hydrobloc P500, potência de 0,5 HP, a qual enviava a solução do tanque de alimentação até o leito de recheio. Ao entrar no equipamento a solução passava por um tubo fino que injetava o líquido, cuja função era aumentar a velocidade de entrada do fluido no “olho do rotor”, dificultando o arraste deste fluido pela corrente gasosa que deixa o leito nesta mesma localização do equipamento. Detalhes do distribuidor e injetor da fase líquida são apresentados na Figura 3.3. Foram propostos inicialmente 3 tubos injetores a ser testados, sendo o diâmetro dos tubos injetores 3,0 mm; 4,5 mm e 6,2 mm respectivamente.

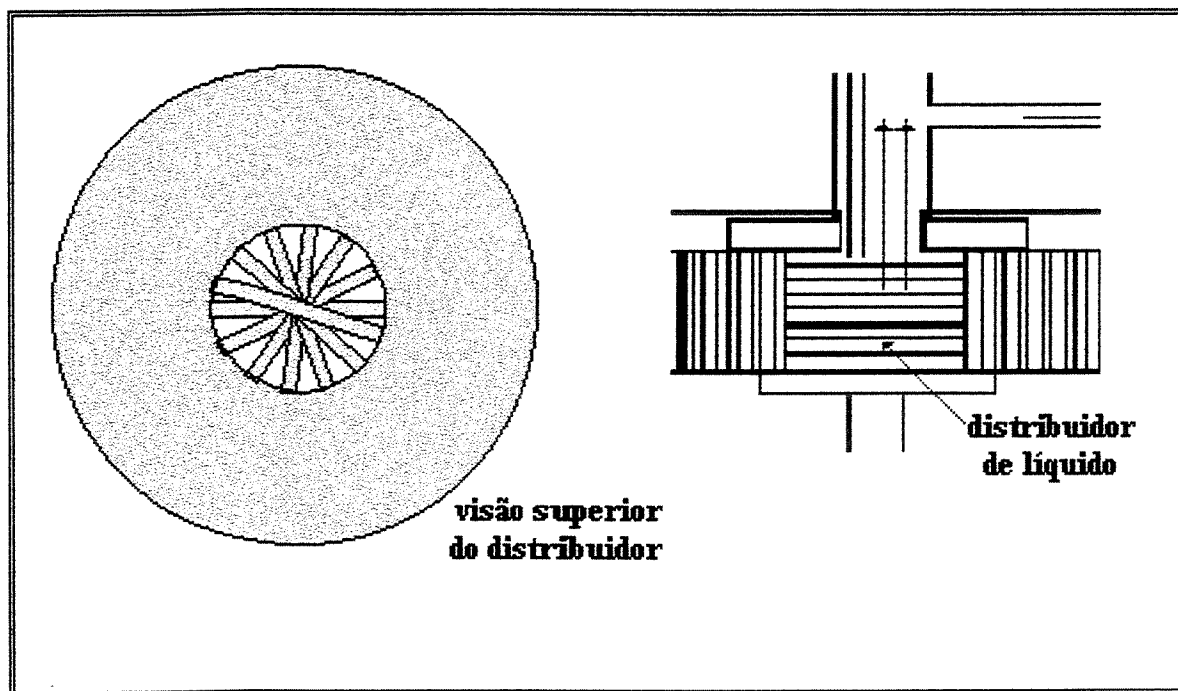


Figura 3.3: Dispositivo de Injeção e Distribuição da Fase Líquida.

O controle de vazão da fase líquida foi realizado por meio de um rotâmetro volumétrico previamente calibrado, cuja curva de calibração é apresentada na Figura 3.4.

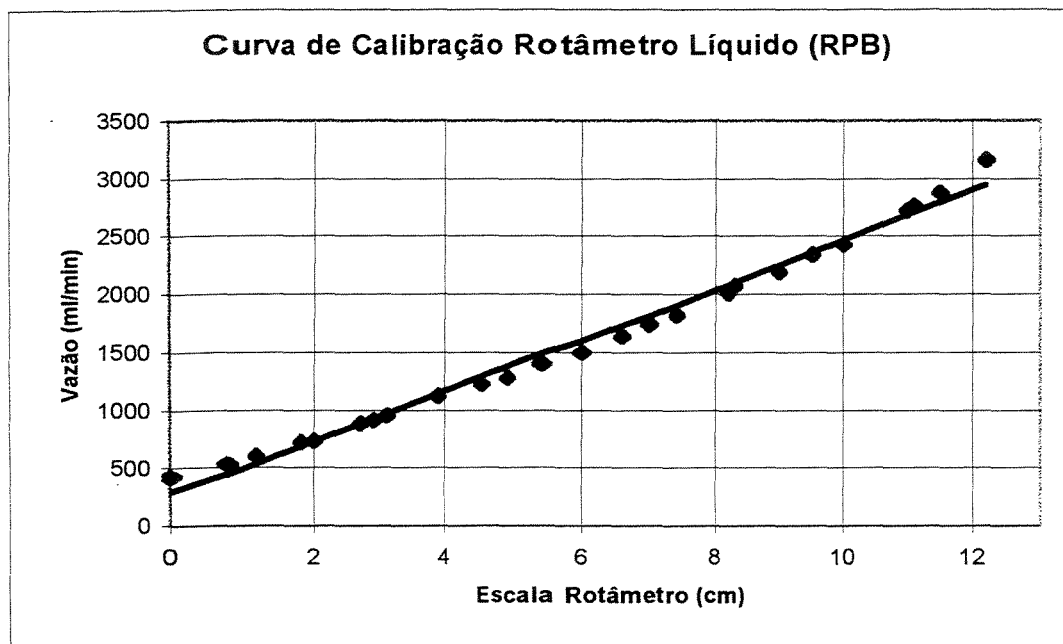


Figura 3.4: Curva de Calibração do Rotâmetro para a Fase Líquida.

Da regressão dos dados de calibração para o rotâmetro da fase líquida foi obtida a equação 3.1, que relaciona a vazão real “ $Q_L$ ” [ml/min] e a leitura obtida na escala do rotâmetro “ $L_{RA}$ ” [cm], cujo coeficiente de correlação,  $R^2$ , corresponde a 0,9905.

$$Q_L = 217,66 \times L_{RA} + 285,44 \quad (3.1)$$

### 3.1.3 – Sistema de Alimentação da Fase Gasosa

O ar utilizado nos testes era proveniente de uma linha de ar comprimido. Antes de passar pelas válvulas o ar era filtrado evitando a presença de impurezas que viessem mascarar os resultados experimentais.

O controle de vazão da fase gasosa foi realizado por meio de dois rotâmetros, um de alta vazão e o outro de baixa vazão, cujas curvas de calibração são apresentadas na Figuras 3.5 e 3.6. Da regressão dos dados de calibração dos rotâmetros foram determinadas as equações 3.2 (alta vazão), e 3.3 (baixa vazão), com coeficientes de correlação 0,9977 e 0,9906 respectivamente, as

quais relacionam a vazão real de ar “ $Q_{ar}$ ” [l/min] com a leitura obtida na escala do rotâmetro de alta vazão “ $L_{arA}$ ” e baixa vazão “ $L_{arB}$ ” [mm].

$$Q_{ar} = 0,5069 \times L_{arA} + 2,3093 \quad (3.2)$$

$$Q_{ar} = 0,3264 \times L_{arB} - 3,0618 \quad (3.3)$$

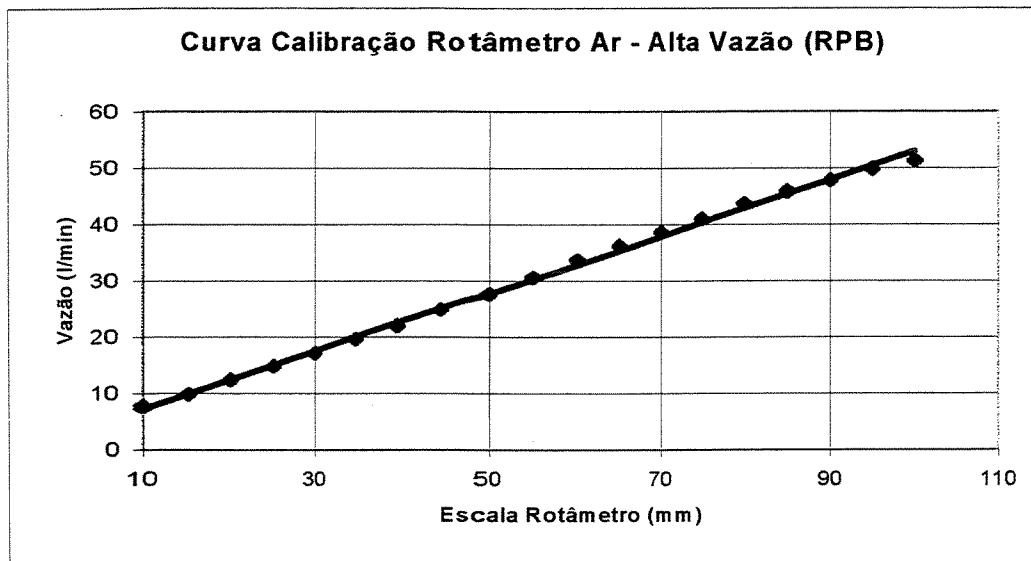


Figura 3.5: Curva de Calibração Rotâmetro de Alta Vazão para Fase Gasosa.

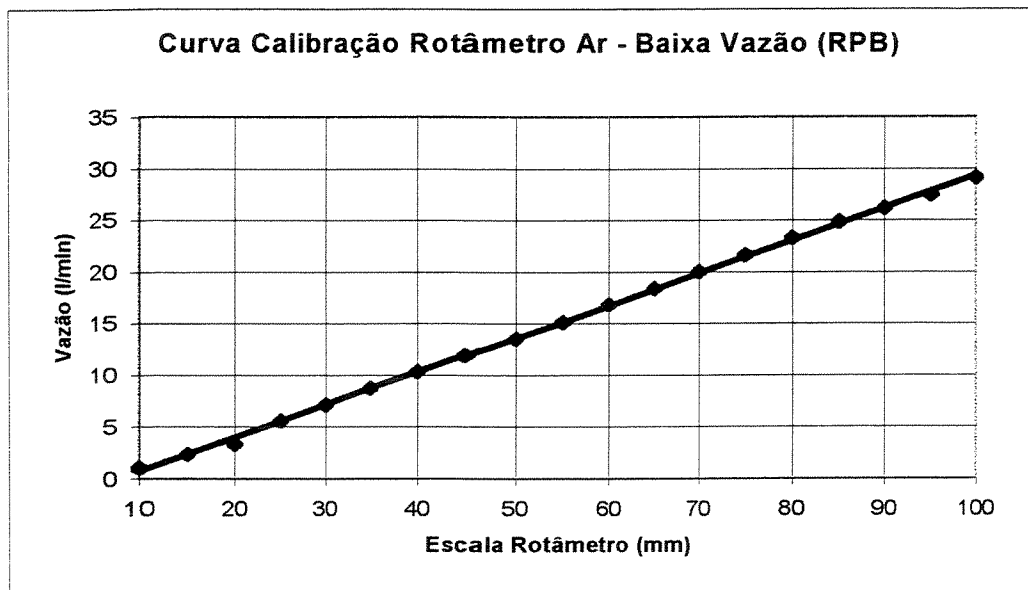


Figura 3.6: Curva de Calibração Rotâmetro de Baixa Vazão para Fase Gasosa.

Nos experimentos de transferência de massa era visada a avaliação da transferência resultante do mecanismo da difusão. Em testes preliminares foi constatado que poderia estar ocorrendo transferência por evaporação da fase líquida, uma vez que o ar poderia estar entrando insaturado no equipamento (seco). Foi então solucionado o problema através da construção de um saturador de ar, que era composto por dois tubos contendo água em seu interior, por onde a fase gasosa passava, saturando o ar que entrava no equipamento, evitando o mecanismo da evaporação da fase líquida.

A trajetória percorrida pelo fluxo de ar começa pelos rotâmetros, depois a corrente passa pelo saturador de água e, em seguida, entra no equipamento centrífugo. O ar escoava de fora para dentro do rotor, estabelecendo contato em contracorrente com o líquido que sai do rotor, deixando o dispositivo pelo centro, sendo então descartado para a atmosfera.

#### 3.1.4 – Sistema de Transmissão Mecânica

O sistema de transmissão mecânica é constituído por um eixo que liga o rotor a uma polia, que por sua vez recebe o impulso mecânico do motor por meio de uma correia, como mostra a Figura 3.7. O motor utilizado era da marca WEG, que trabalha em corrente alternada, 220 v, trifásico, potência de 0,33 hp. Este motor trabalha a velocidade de 3390 rpm se alimentado com uma corrente elétrica com frequência de 60 Hz.

Foi implementado ao sistema operacional um freqüencímetro, da marca ZENER, modelo MSC-53, com o objetivo de controlar a frequência da corrente elétrica de alimentação do motor, e desta forma, controlar a velocidade de rotação do leito centrífugo.

O freqüencímetro empregado controlava a frequência da rede elétrica em uma faixa de 0 – 100 Hz. Foi então montada uma curva de calibração entre a velocidade de rotação e a frequência controlada pelo aparelho, possibilitando a avaliação do sistema operacional em uma faixa de rotação entre 0 – 5100 rpm, como mostra a Figura 3.8.

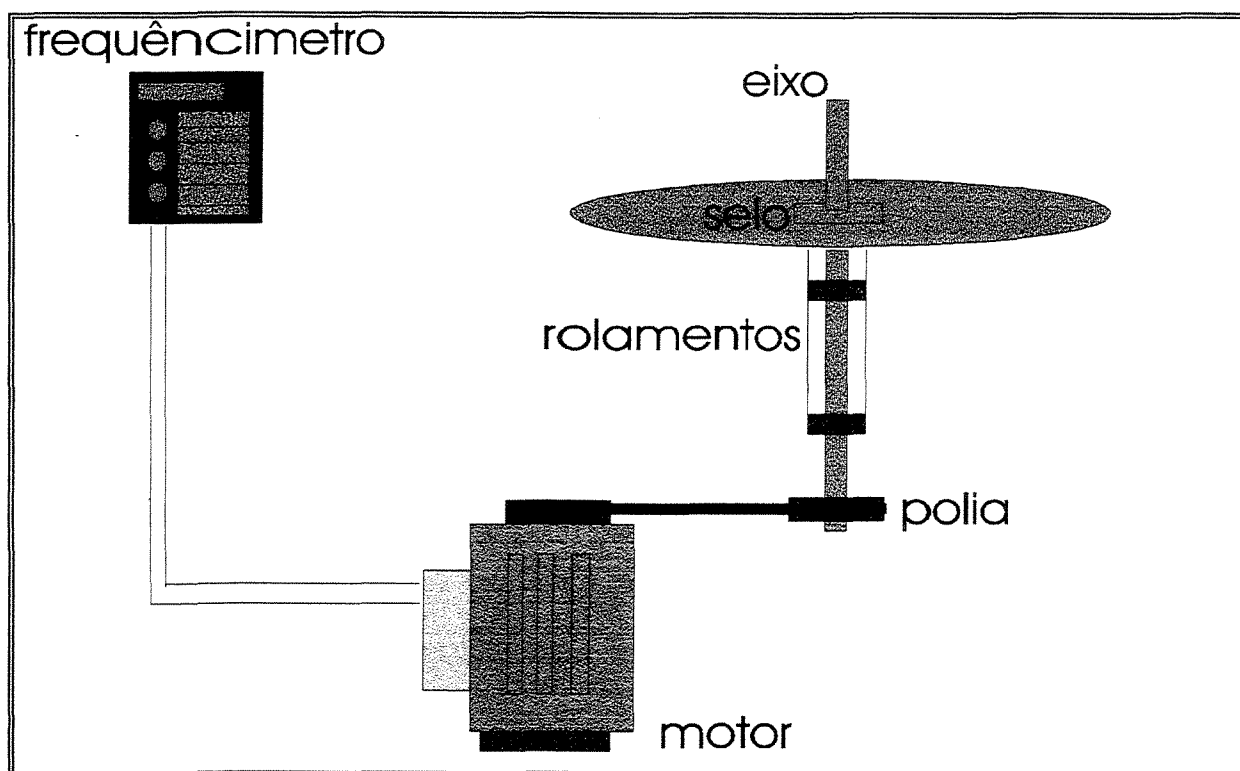


Figura 3.7: Sistema de Transmissão Mecânica.

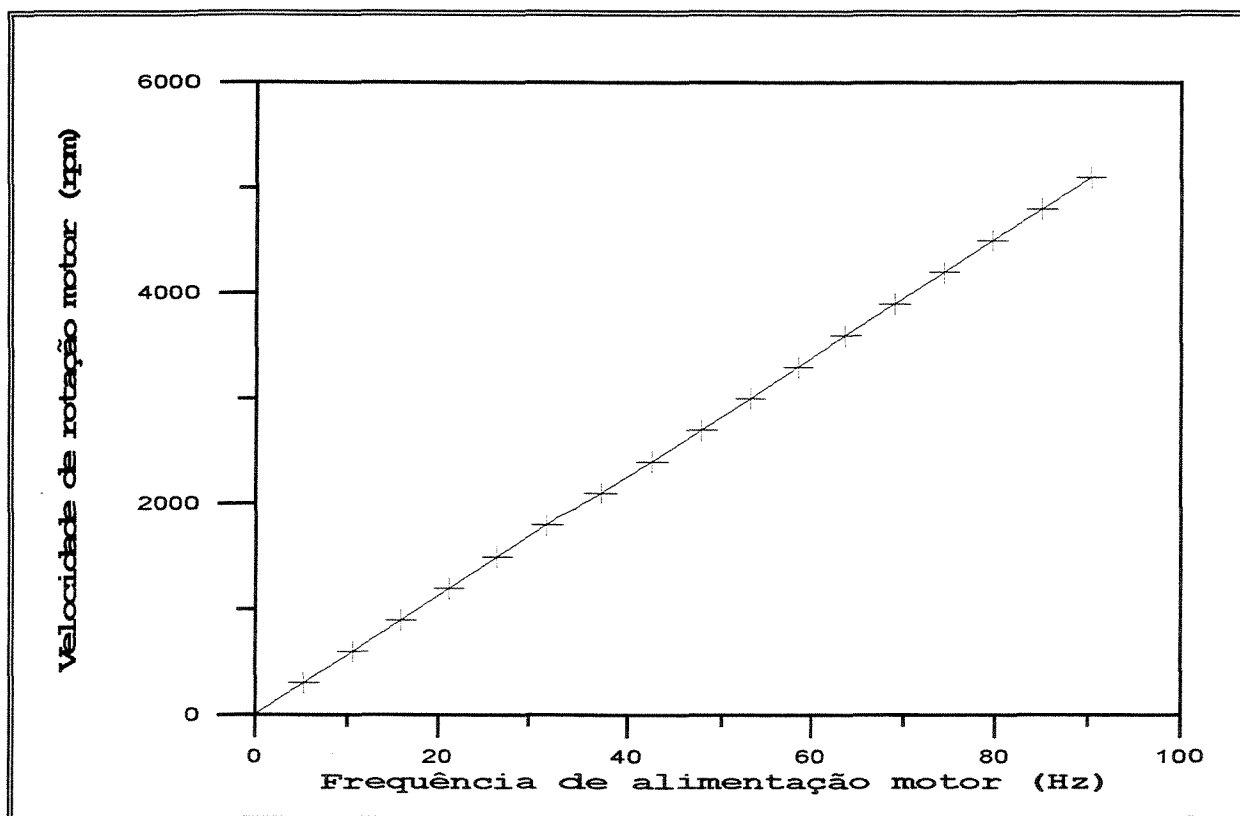


Figura 3.8: Velocidade de Rotação vs. Frequência de Alimentação do Motor.

### 3.1.5 – Sistema de Controle de Temperatura

Foi definido inicialmente que as medidas de transferência de massa deveriam ser realizadas à temperatura constante de 25°C, visando a análise isotérmica do equipamento. Foi então implementado ao sistema experimental um banho termostático que tinha por finalidade o controle de temperatura da fase líquida.

A solução líquida proveniente do tanque de alimentação passava por uma serpentina, que ficava dentro do banho, e depois era enviada para o leito de recheio. A temperatura da fase líquida era monitorada no ponto imediatamente anterior à entrada do leito, e o controle de temperatura era realizado em função do parâmetro neste ponto.

O controle de temperatura foi realizado por meio de um banho termostático da marca VEB MLW PGW MEDINGEN, modelo MK70, de potência 1,72 KW, fabricado na Alemanha, cuja faixa de controle de temperatura varia entre -60 e 35°C.

### 3.1.6 – Manômetro de Tubo em U

A determinação da queda de pressão no leito de recheio centrífugo foi realizada por meio de medidas da queda de pressão para a fase gasosa, tomando como referência o ponto de entrada e de saída desta fase do leito centrífugo. Visando a realização destas medidas, foi construído um manômetro de tubo em U, que utilizava água como fluido manométrico.

### 3.1.7 - Enchimento de Recheio

O comportamento hidrodinâmico e de transferência de massa foi determinado para o equipamento centrífugo operando com 4 recheios diferentes, além da análise efetuada para o leito vazio (s/ recheio). As características dos recheios são apresentadas na Tabela 3.1.

Os tipos de recheio foram numerados como mostra a Tabela 3.1, e serão identificados no transcorrer do trabalho por este número. O recheio n° 4 foi construído a partir de uma tela de latão (wire mesh), de onde foram montados os cilindros estruturados, e devido às características físicas deste recheio, ele proporciona a obtenção de alta área de contato entre as fases podendo exercer forte influência na performance de transferência de massa do equipamento, o que seria analisado experimentalmente.

Tabela 3.1: Características dos Recheios Analisados.

| Recheio | Forma do recheio           | Material | Diâmetro Int. (cm) | Diâmetro Ext. (cm) | Altura (cm) | Poros. | Área Super. (cm <sup>-1</sup> ) |
|---------|----------------------------|----------|--------------------|--------------------|-------------|--------|---------------------------------|
| 01      | Anéis de Raschig           | Cerâmica | 0,40               | 0,70               | 0,70        | 0,55   | 4,84                            |
| 02      | Anéis de Raschig           | Cerâmica | 0,50               | 0,90               | 0,90        | 0,62   | 4,48                            |
| 03      | Anéis de Raschig           | Alumínio | 0,85               | 0,95               | 0,95        | 0,91   | 4,80                            |
| 04      | Cilindros de tela metálica | Latão    | 0,35               | 0,37               | 1,20        | 0,95   | 5,99                            |

### 3.1.8 – Medidas de Concentração

As análises quantitativas da transferência de massa, ocorrida entre as fases, poderiam ser realizadas por meio de medidas da variação da concentração, ocorrida com a fase líquida ou com a fase gasosa. Com o objetivo de facilitar o trabalho de medida, foi tomado como referência a variação ocorrida com a fase líquida, que foi avaliada por meio de medidas de transmitância realizadas em espectrofotômetro operando na região de ultra violeta (300 nm). Foi utilizado espectrofotômetro da marca MILTON ROY COMPANY, modelo SPECTRONIC 21, que opera com comprimento de onda na faixa de 200 à 1000 nm.



Neste trabalho, os experimentos de transferência de massa foram realizados alimentando o leito de recheio com solução acetona-água com concentração aproximada de 1,5 mol%, detalhes serão discutidos neste capítulo na seção concernente à metodologia. Baseado nesta informação, foi determinada a curva de calibração do espectrofotômetro para a solução acetona-água, para a faixa de concentração entre 0 e 2,0 mol%, operando o aparelho com alta sensibilidade e comprimento de onda de 300 nm, como mostra a Figura 3.9.

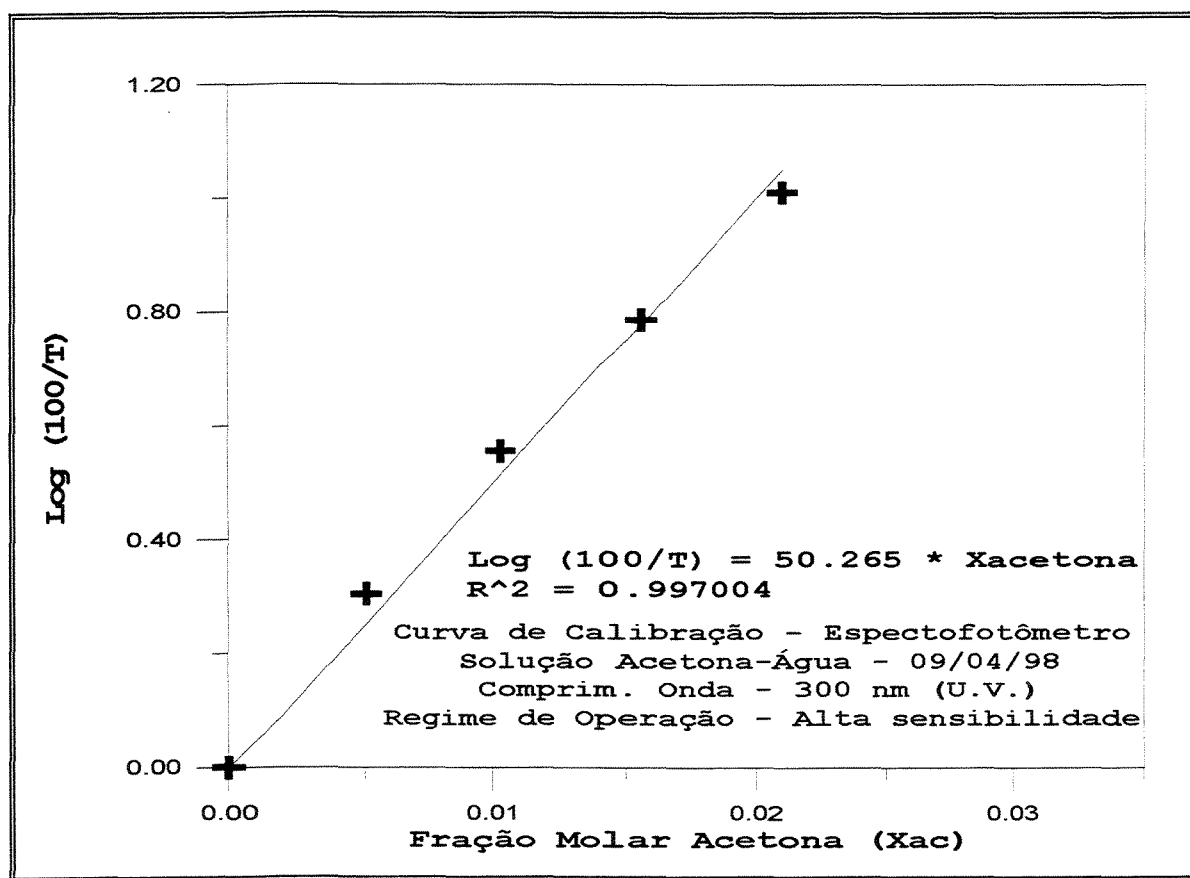


Figura 3.9: Curva de Calibração Espectrofotômetro.

### 3.2 - Materiais

Os materiais utilizados na determinação das características do equipamento foram as soluções reagentes, sendo que na parte hidrodinâmica foram utilizados ar, fase gasosa, e água

como fase líquida. Na segunda fase do trabalho, transferência de massa, foi utilizado um sistema ar-água-acetona.

Na primeira fase do trabalho, o objetivo era a determinação do comportamento hidrodinâmico do equipamento, visando a preparação do equipamento para as análises de transferência de massa. As fases gasosa e líquida eram compostas por ar e água, respectivamente. O ar era proveniente de uma linha de ar comprimido, sendo que antes de entrar no equipamento era submetido a um filtro evitando possíveis impurezas. A fase líquida composta por água potável, não destilada, que era alimentada à temperatura ambiente.

Na realização das análises de transferência de massa eram necessários cuidados adicionais em relação as soluções reagentes. A fase líquida composta por solução aquosa de acetona era preparada a partir de água destilada e soluto de acetona P.A., e esta solução era alimentada no equipamento a temperatura constante de 25°C. A fase gasosa era submetida a um saturador de coluna de água antes de entrar no equipamento, evitando a ocorrência de evaporação da fase líquida durante o contato entre as fases, o que viria a mascarar as medidas de transferência de massa por difusão. A escolha do sistema para esta fase do trabalho foi baseada nos seguintes critérios:

- 1) O soluto, componente a ser transferido entre as fases, deveria ser um composto volátil de fácil transferência para a fase gasosa.
- 2) O sistema experimental deveria ser compatível com os equipamentos de análises de concentração disponíveis no laboratório de pesquisa.
- 3) Os reagentes deveriam ser de baixo custo.

Todos experimentos de transferência de massa foram realizados alimentando o leito com a fase líquida à concentração aproximada de 1,5 mol% de acetona. Essa padronização foi definida visando trabalhar com soluções diluídas, propiciando a utilização da Lei de Henry na determinação do equilíbrio gás-líquido.

### 3.3 – Metodologia

Nesta seção serão abordados os métodos experimentais e as equações de balanço propostas para a quantificação do desempenho do equipamento centrífugo.

#### 3.3.1 – Hidrodinâmica

Nesta primeira etapa do trabalho foram realizadas observações experimentais da queda de pressão, ocorrida no leito centrífugo, e também foi determinada a região de operação estável do equipamento, onde não ocorre arraste de líquido pela fase gasosa.

##### 3.3.1.1 – Efeito do Injetor na Hidrodinâmica

Como foi abordado neste capítulo, no item 3.1.2, a fase líquida é alimentada no centro do rotor. Ao entrar no equipamento o líquido passa por um tubo, o injetor de líquido, e a seguir é lançado contra o distribuidor helicoidal que uniformemente dispersa a fase sobre o leito de recheio.

A velocidade do jato que sai do injetor é determinada pelo diâmetro deste dispositivo, e inicialmente, suspeitava-se que esta velocidade poderia exercer influência no comportamento hidrodinâmico do sistema. Foi então proposto testar 3 injetores de diâmetros diferentes sendo 3,0 mm; 4,5 mm e 6,2 mm respectivamente. Uma vez que no centro do equipamento ocorre simultaneamente a entrada da fase líquida e a saída da fase gasosa, a velocidade de injeção da fase líquida poderia influenciar o fenômeno do arraste de líquido pela fase gasosa.

O procedimento experimental inicia-se com a alimentação das fases líquida e gasosa a uma vazão pré determinada. É então ligado o motor e inicia-se a rotação do leito centrífugo. A velocidade do leito é aumentada gradualmente de 100 rpm, e em cada ponto são aguardados 3

minutos, tempo de estabilização, e em seguida é observado se ocorre o fenômeno do arraste de líquido na saída da fase gasosa.

A faixa de operação testada constituiu-se de velocidade de rotação entre 0 e 5100 rpm, vazão da fase gasosa entre 10 e 80 l/min e da fase líquida entre 0,5 e 2,0 l/min. Como visava-se a determinação do efeito do injetor no arraste, o leito centrífugo foi operado vazio (sem recheio).

#### 3.3.1.2 – Determinação da Faixa de Operação Estável

Determinado o injetor mais eficiente para o equipamento, foram então avaliadas a queda de pressão e o arraste de líquido, desta vez operando o leito com enchimento de recheio.

O procedimento realizado foi análogo ao executado no item anterior (3.1.1.1), entretanto, juntamente com a observação do arraste eram realizadas as medidas de queda de pressão ocorrida no leito de recheio. A faixa de operação testada também foi a mesma do item anterior para os quatro tipos de recheio.

Das observações experimentais foi determinada a faixa de operação estável, onde não ocorre arraste de líquido, faixa esta em que serão realizados os experimentos de transferência de massa, segunda etapa deste trabalho.

#### 3.3.2 – Transferência de Massa

Visando a determinação dos coeficientes globais de transferência de massa,  $K_G a$ , para o equipamento centrífugo, foram propostos experimentos de dessorção utilizando sistema ar-água-acetona.

Com o intuito de comparação da performance do equipamento centrífugo em relação a um leito convencional estático, foi realizado o dimensionamento de torres convencionais que propiciassem transferência de massa equivalente as obtidas no rotativo, operando nas mesmas condições de escoamento.

### 3.3.2.1 – Metodologia Experimental

O procedimento deu-se da seguinte forma: inicialmente uma determinada quantidade de solução acetona-água aproximadamente 1,5mol% foi preparada, em seguida, foi ligada a bomba centrífuga, que enviava a fase líquida do tanque de alimentação até o rotâmetro de controle de vazão, passando por um banho termostático que controlava a temperatura desta fase em 25°C. Ao chegar ao rotâmetro a vazão da fase líquida era ajustada e então injetada no leito de recheio onde estabelecia contato com a fase gasosa, e em seguida, era arremessada contra a parede da câmara estacionária, escoando até o dispositivo de saída da fase líquida. A fase gasosa, constituída por ar proveniente de uma linha de ar comprimido, era controlada por dois rotômetros, e ao deixar estes dispositivos era submetida ao saturador de coluna de água seguindo para a câmara estacionária. Após entrar na câmara, a fase gasosa atravessava o leito de recheio, estabelecendo contato com a fase líquida, deixando o leito pelo centro do equipamento.

A determinação da quantidade de acetona transferida entre as fases foi baseada na variação de concentração da fase líquida. As amostras foram analisadas através de medidas de transmitância em espectrofotômetro operando na região de ultravioleta.

Depois que o equipamento alcançava condições estáveis de escoamento, tempo aproximado de 2 minutos, era retirada uma amostra da solução que entrava no leito, aguardavam-se cinco minutos e então era retirada outra amostra da solução, desta vez, na saída do equipamento. O procedimento era repetido 3 vezes para cada experimento.

Todos os experimentos de transferência de massa foram realizados operando o equipamento na faixa de operação estável, determinada na etapa de análises hidrodinâmicas. Foram utilizadas vazões de líquido de 0,5; 1,0 e 1,5 l/min; vazões de ar de 30, 45 e 60 l/min e velocidades de rotação de 500, 1500, 3000 e 5000 rpm. Foram realizados testes para os quatro recheios propostos inicialmente, além dos testes para o equipamento vazio (s/ recheio).

## 3.3.2.2 – Balanço de Massa no Equipamento

Considerando as correntes de entrada “ $G_2$  e  $L_1$ ”, e de saída “ $G_1$  e  $L_2$ ” e suas respectivas frações molares, representadas na Figura 3.10, pode ser determinada a equação 3.4, que descreve o balanço de massa global no equipamento centrífugo.

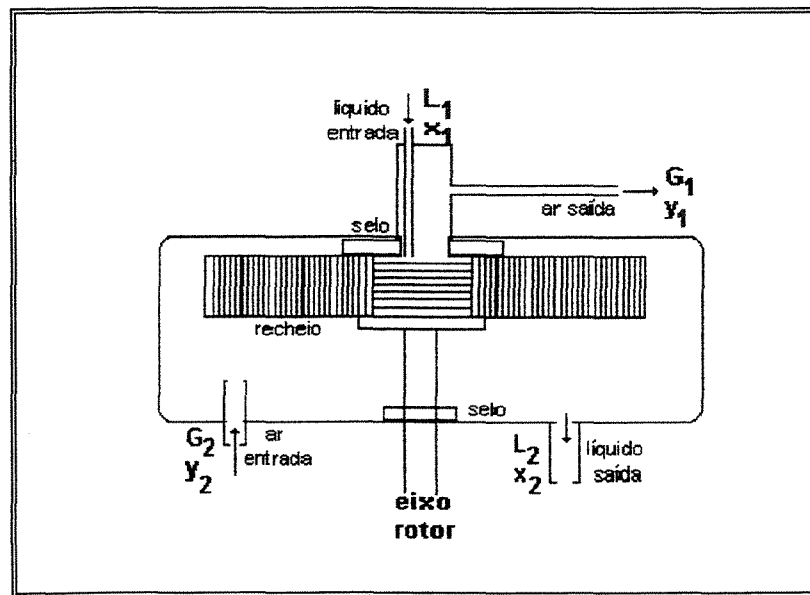


Figura 3.10: Correntes de Escoamento no Equipamento Centrífugo.

$$L_1 x_1 + G_2 y_2 = G_1 y_1 + L_2 x_2 \quad (3.4)$$

Considerando as concentrações das fases explicitadas em razões molares, equações 3.5 – 3.8, o balanço de massa global pode ser descrito pela equação 3.9.

$$X = \frac{x}{1 - x} \quad (3.5)$$

$$Y = \frac{y}{1 - y} \quad (3.6)$$

$$G_s = G(1 - y) = \frac{G}{1 + Y} \quad (3.7)$$

$$L_s = L(1 - x) = \frac{L}{1 + X} \quad (3.8)$$

$$L_s X_1 + G_s Y_2 = L_s X_2 + G_s Y_1 \quad (3.9)$$

### 3.3.2.3 – Determinação de Coeficientes de Transferência Experimentais

No desenvolvimento das equações para o cálculo dos coeficientes globais volumétricos de transferência de massa são utilizados os conceitos de unidade de transferência e balanço de massa no equipamento, baseados em coordenadas cilíndricas.

O fluxo material transferido entre as fases pode ser descrito pela equação 3.10.

$$N_A = K_G P_T (y - y^*) = K_L (C^* - C) \quad (3.10)$$

A área interfacial específica proporcionada pelo recheio pode ser analisada de acordo com a equação 3.11.

$$a = \frac{\text{área interfacial}}{\text{unidade de volume do equipamento}} \quad (3.11)$$

Em relação ao equipamento centrífugo, a unidade de volume do equipamento pode ser definida pela equação 3.12.

$$\text{unidade de volume} = 2\pi z r dr \quad (3.12)$$

Combinando as equações 3.12 e 3.11 obtêm-se:

$$\text{área interfacial} = a 2 \pi z r dr \quad (3.13)$$

Aplicando a equação 3.13 nos dois primeiros membros da equação 3.10 obtêm-se:

$$N_A a 2 \pi z r dr = K_G P_T (y - y^*) a 2 \pi z r dr \quad (3.14)$$

O fluxo material “ $N_A$ ” pode ser definido pela equação 3.15.

$$N_A = \frac{\text{moles transferidos de } A}{\text{área interfacial} \cdot \text{tempo}} = \frac{\text{moles transferidos de } A}{a 2 \pi z r dr \cdot \text{tempo}} \quad (3.15)$$

Rearranjando a equação 3.15 obtêm-se:

$$N_A a 2 \pi z r dr = \frac{\text{moles transferidos de } A}{\text{tempo}} = G_{MT} dy \quad (3.16)$$

Substituindo a equação 3.16 em 3.14 obtêm-se:

$$G_{MT} dy = K_G a P_T 2 \pi z r dr (y - y^*) \quad (3.17)$$

Separando as variáveis da equação 3.17, é obtida a equação 3.18.

$$G_{MT} \frac{dy}{y - y^*} = K_G a P 2 \pi z r dr \quad (3.18)$$

Se o sistema, a ser analisado, for de baixa concentração, diluído, a fração molar “ $y^*$ ” pode ser determinada pela Lei de Henry, como mostra a equação 3.19.



$$y^* = Hc \, x \quad (3.19)$$

O balanço material para o soluto no equipamento pode ser descrito pela equação 3.20.

$$x = x_2 + \frac{G_{MT}}{L_{MT}}(y - y_2) \quad (3.20)$$

Substituindo as equações 3.19 e 3.20 em 3.18, e integrando entre raio externo e raio interno e entre fração molar gasosa na entrada e na saída do leito, obtêm-se:

$$G_{MT} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - Hc \left[ x_2 + \frac{G}{L}(y - y_2) \right]} = K_G a P_T 2 \pi z \int_{r_2}^r r \, dr \quad (3.21)$$

Integrando a equação 3.21 é obtida a equação 3.22, através da qual são determinados os coeficientes globais volumétricos de transferência de massa experimentais, lembrando-se que “S” equivale à “ $(Hc \cdot G_{MT}) / L_{MT}$ ”.

$$K_G a = \frac{G_{MT}}{P_T z (r_2^2 - r_1^2) \pi} \frac{\ln \left[ (1 - S) \frac{y_1 - Hc \, x_2}{y_2 - Hc \, x_2} + S \right]}{S - 1} \quad (3.22)$$

Se for realizada análise similar para a transferência de massa, baseando-se na fase líquida, será obtida a equação 3.23.

$$K_L a = \frac{Q_L}{z (r_2^2 - r_1^2) \pi} \frac{\ln \left[ \left( 1 - \frac{1}{S} \right) \cdot \frac{x_1 - y_2 / Hc}{x_2 - y_2 / Hc} + \left( \frac{1}{S} \right) \right]}{1 - 1/S} \quad (3.23)$$

Nos experimentos de transferência de massa foram obtidas as variáveis representadas nas equações 3.22 e 3.23, que em conjunto com as dimensões do equipamento, tais como raio interno

e externo, altura do rotor, também representadas nas equações, possibilitaram a determinação dos coeficientes globais volumétricos de transferência de massa.

### 3.3.2.4 – Predição de Equilíbrio Termodinâmico

Na determinação do equilíbrio líquido vapor para o sistema acetona-água foi utilizado o modelo de Wilson, que apresenta boa precisão na determinação do equilíbrio, uma vez que relaciona os desvios da idealidade aos parâmetros energia molar livre de excesso e volume molar.

O modelo proposto por Wilson é baseado na função logarítmica representada pela equação 3.24.

$$\frac{g^E}{RT} = - \sum_{i=1}^N x_i \ln \left[ \sum \Lambda_{ij} x_j \right] \quad (3.24)$$

Os parâmetros de Wilson  $\Lambda_{ij}$ , são funções das constantes do modelo ( $\lambda_{ij} - \lambda_{ii}$ ), dos volumes molares dos componentes  $v_j^L$  e  $v_i^L$  e da temperatura como mostra a equação 3.25.

$$\Lambda_{ij} = \frac{v_j^L}{v_i^L} \exp \left[ - \frac{(\lambda_{ij} - \lambda_{ii})}{RT} \right] \quad (3.25)$$

Os coeficientes de atividade foram então definidos pela equação 3.26.

$$RT \ln \gamma_i = \left( \frac{\partial n_T g^E}{\partial n_i} \right)_{T, P, n_{j \neq i}} \quad (3.26)$$

Quando é aplicada a equação 3.26 em conjunto com a equação 3.24, para um sistema binário, são obtidas as equações 3.27 e 3.28.

$$\ln \gamma_1 = -\ln(x_1 + \Lambda_{12} x_2) + x_2 \left[ \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12} x_2} - \frac{\Lambda_{21}}{\Lambda_{21} x_1 + x_2} \right] \quad (3.27)$$

$$\ln \gamma_2 = -\ln(x_2 + \Lambda_{21} x_1) - x_1 \left[ \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12} x_2} - \frac{\Lambda_{21}}{\Lambda_{21} x_1 + x_2} \right] \quad (3.28)$$

Para o sistema acetona (1) – água (2) as constantes foram determinadas ( $\lambda_{12} - \lambda_{11}$ ) 439,64 e ( $\lambda_{21} - \lambda_{22}$ ) 1405,49, Holmes (1970), que em conjunto com os volumes molares para os componentes torna possível a determinação dos coeficientes de atividade.

A composição de equilíbrio  $y_i$  em equilíbrio com o fração molar na fase líquida  $x_i$ , pode ser determinada pela equação 3.29.

$$y_i^* = \frac{\gamma_i x_i P_i^{sat}}{P} \quad (3.29)$$

A pressão de saturação para os componentes pode ser determinada pela equação de Antoine, Holmes (1970), cujas constantes foram determinadas para os componentes acetona e água e estão apresentadas na Tabela 3.2.

$$\log_{10} P_i^{sat} = A - \frac{B}{C + t} \quad (3.30)$$

Tabela 3.2: Constantes de Antoine.

| Componente\constante | A       | B       | C     |
|----------------------|---------|---------|-------|
| Acetona              | 7,02447 | 1161,00 | 224,0 |
| Água                 | 7,96681 | 1668,21 | 228,0 |

Tendo em vista realizar os estudos de transferência de massa operando com soluções diluídas de acetona-água, foi determinada, nos testes iniciais, a faixa de variação de concentração da fase líquida para o equipamento, e a partir desta faixa foi determinada a composição de equilíbrio da fase gasosa, através do modelo de Wilson, como é apresentado na Tabela 3.3, sendo que o equilíbrio foi determinado para a pressão atmosférica de 700 mmHg (Campinas) e temperatura de 25 °C.

Tabela 3.3 – Equilíbrio Acetona-Água.

| $x_{\text{acetona}}$ | $y^*_{\text{acetona}}$ (equilíbrio) |
|----------------------|-------------------------------------|
| 0.0125               | 0.05430                             |
| 0.0130               | 0.05609                             |
| 0.0135               | 0.05784                             |
| 0.0140               | 0.05957                             |
| 0.0145               | 0.06128                             |
| 0.0150               | 0.06296                             |
| 0.0155               | 0.06462                             |
| 0.0160               | 0.06626                             |
| 0.0165               | 0.06787                             |

Através dos dados apresentados na Tabela 3.3, foi determinada a equação 3.31, que relaciona a composição do vapor  $y^*_{\text{acetona}}$  em equilíbrio com o líquido  $x_{\text{acetona}}$ , sendo que a equação apresenta coeficiente de correlação  $R^2$  0,999743 para a faixa de concentração apresentada na Tabela 3.3.

$$y^*_{\text{acetona}} = 3.39133.x_{\text{acetona}} + 0.01203 \quad (3.31)$$

## 3.3.2.5 – Coeficientes de Transferência de Massa para Leitos Convencionais

Com o objetivo de comparação entre os coeficientes de transferência de massa obtidos para o leito de recheio centrífugo e os relativos ao leito convencional, foram determinados os valores de  $K_G a$  para o sistema convencional por meio da correlação de Onda (Perry e Chilton, 1973), com equações apresentadas nas equações 3.32 à 3.35.

$$k_l \left( \frac{\rho_l}{\mu_l g} \right)^{1/3} = 0.0051 \left( \frac{L}{a \mu_l} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu_l}{\rho_l D_l} \right)^{-0.5} (a_t D_p)^{0.4} \quad (3.32)$$

$$\frac{a}{a_t} = 1 - \exp \left[ -1.45 \left( \frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{0.75} N_{Re}^{0.1} N_{Fr}^{-0.05} N_{We}^{0.2} \right] \quad (3.33)$$

$$\frac{k_g R T}{a_t D_g} = 2.00 \left( \frac{G}{a_t \mu_g} \right)^{0.7} \left( \frac{\mu_g}{\rho_g D_g} \right)^{1/3} (a_t D_p)^{-2.0} \quad (3.34)$$

$$\frac{1}{K_G a} = \frac{1}{k_g a} + \frac{H}{k_l a} \quad (3.35)$$

O coeficiente de transferência de massa obtido para o leito centrífugo era comparado ao coeficiente obtido para um leito convencional, operando sob as mesmas taxas de vazão das fases líquida e gasosa e enchimento de recheio. Desta comparação seria estabelecida a eficiência de transferência de massa do equipamento centrífugo em relação ao convencional estático.

Uma outra forma de verificar o maior rendimento do equipamento centrífugo consiste em, para uma determinada separação ocorrida no leito centrífugo, dimensionar um leito convencional, área de escoamento e altura, necessários à realização da mesma taxa de transferência de massa. O dimensionamento do leito foi realizado tomando como base o conceito de unidade de transferência, abordado no item 2.5 do capítulo anterior desta dissertação, determinada pelo produto do número de unidades globais de transferência,  $N_{tOL}$ , pela altura de uma unidade de transferência  $H_{tOL}$ , como mostram as equações 3.36 à 3.38.

$$z = N_{tOL} H_{tOL} \quad (3.36)$$

$$H_{tOL} = \frac{L_m}{K_L a C_T} \quad (3.37)$$

$$N_{tOL} = \frac{\ln \left[ \frac{x_1 - y_2 / H_C}{x_2 - y_2 / H_C} (1 - A) + A \right]}{1 - A} \quad (3.38)$$

$$A = \frac{L}{H_C G} \quad (3.39)$$

No dimensionamento do leito, a área de escoamento foi determinada através da correlação de Eckert (1970), cujos fundamentos foram abordados no item 2.2.2.

## Capítulo 4:

# Resultados e Discussão

## 4 – Resultados e Discussão

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho serão apresentados na sequência, obedecendo a ordem cronológica em que foram realizados os ensaios, sendo primeiramente apresentada a parte hidrodinâmica e em seguida a seção de transferência de massa.

### 4.1 – Hidrodinâmica

Inicialmente foram realizados testes de operabilidade e resistência mecânica do equipamento, onde foram acertados os detalhes de operação, preparando o equipamento para os experimentos.

#### 4.1.1 – Mecanismo de Injeção da Fase Líquida

Dos testes operacionais verificou-se que o tubo injetor influenciava significativamente o regime de escoamento das fases no equipamento, convém ressaltar que o local onde a fase líquida foi injetada, centro do rotor, é o ponto de menor área transversal de escoamento e por onde a fase gasosa deixa o rotor.

Foi então realizada uma primeira fase de experimentos hidrodinâmicos, onde foram testados tubos injetores de diâmetros diferentes, tendo-se como objetivo a minimização do arraste da fase líquida pela fase gasosa. Os tubos injetores testados foram de diâmetros 3,0; 4,5 e 6,2 mm respectivamente. A faixa operacional de teste constituiu-se de velocidade de rotação entre 0 e 5000 rpm, vazão de líquido de 0,5 à 2,0 l/min, vazão de gás de 10 à 80 l/min, e o leito (rotor) foi operado vazio (sem recheio).

Para uma determinada vazão de líquido e de ar, foram realizadas medidas de queda de pressão variando-se a velocidade de rotação de 100 rpm, e para os casos em que ocorreu arraste este foi medido.



## 4.1.1.1 - Resultados Injetor01 (diâmetro 4,5 mm)

As planilhas correspondentes aos experimentos desenvolvidos para este injetor encontram-se descritas no Apêndice A. Para as vazões de gás entre 10 e 45 l/min não foi detectada a presença de arraste de líquido para toda a faixa de vazões de água testada (0,5-2,0 l/min) e velocidades de rotação (0-5000 rpm). Para as vazões de gás de 60 l/min e 80 l/min ocorreu arraste da fase líquida pela fase gasosa, sendo observado o arraste em toda a faixa de velocidade de rotação e vazão da fase líquida testadas.

Para os experimentos com vazão de ar 60 l/min o arraste de líquido pela fase gasosa foi pronunciado quando a vazão de alimentação da fase líquida foi de 0,5 l/min, para as outras vazões o arraste foi pequeno, como pode ser observado pela Figura 4.1.

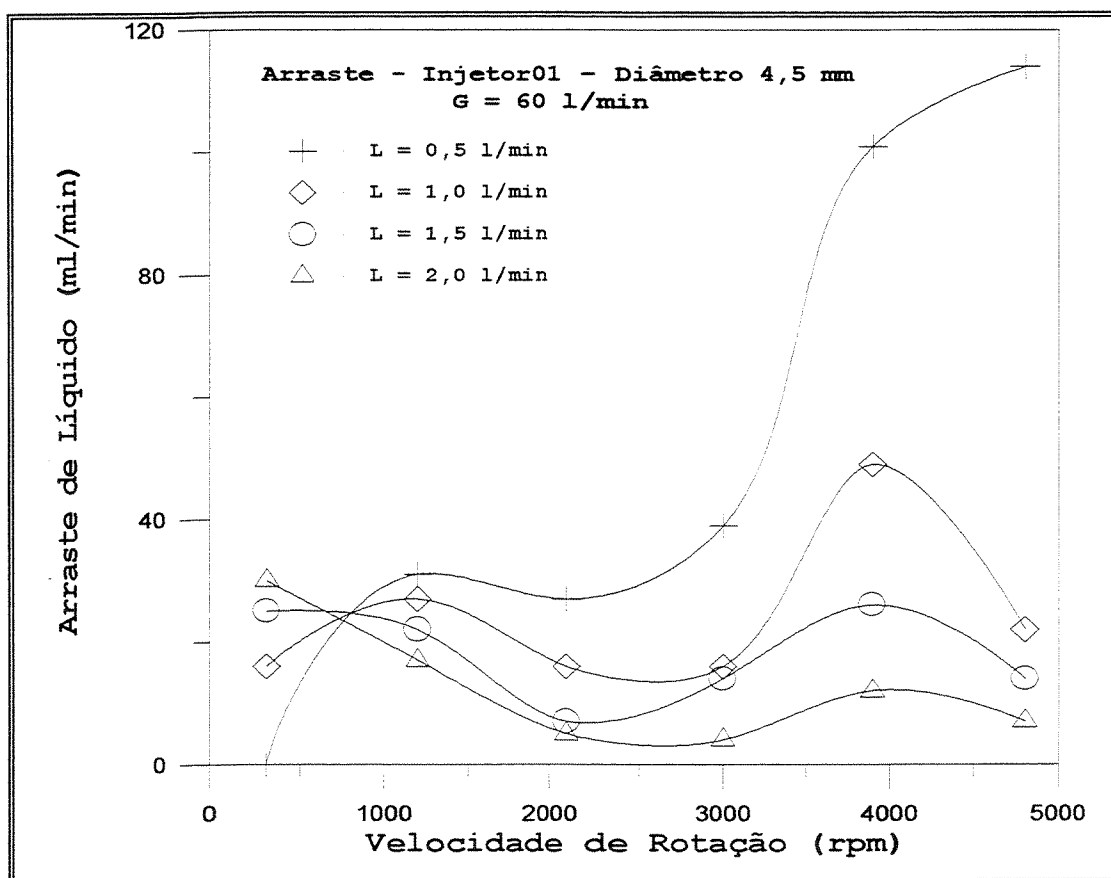


Figura 4.1 – Arraste de Líquido para Injetor01, G= 60 l/min.

A vazão máxima de ar em que foram realizados experimentos constituiu-se de 80 l/min, e para este nível de vazão ocorreu arraste em toda a faixa testada. O arraste foi maior para a menor vazão de líquido (0,5 l/min) e no ponto de maior arraste, aproximadamente 50% do líquido injetado no equipamento era arrastado pela fase gasosa, como pode ser visto pela Figura 4.2.

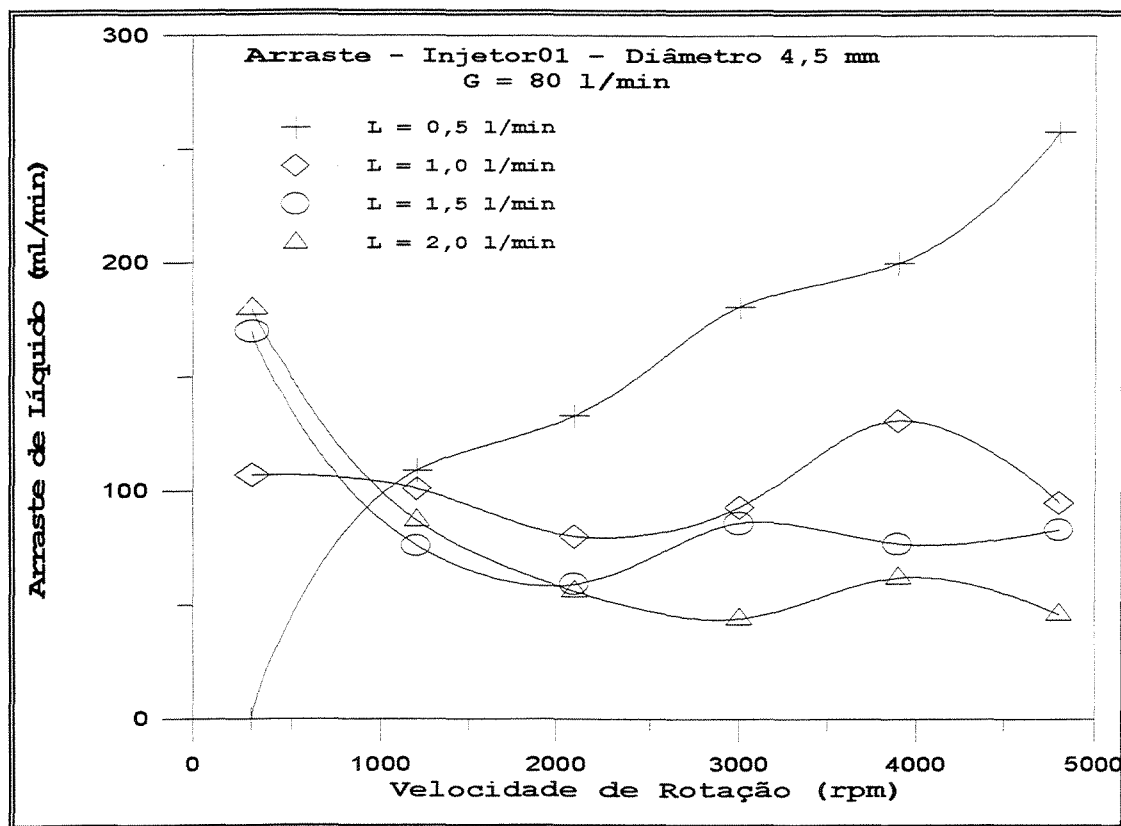


Figura 4.2: Arraste de Líquido para Injetor01, G= 80 l/min.

Em relação às Figuras 4.1 e 4.2 pode notar-se que com o aumento da vazão da fase líquida o arraste diminui, principalmente se o equipamento estiver sendo operado sob regime de alta velocidade de rotação.

## 4.1.1.2 - Resultados Injetor02 (diâmetro 6,2 mm)

Este injetor tem diâmetro 38% maior que o Injetor01, e devido a este fato, o líquido foi injetado a uma velocidade menor no equipamento, para uma mesma vazão da fase líquida. Os resultados obtidos nos experimentos encontram-se descritos no Apêndice A.

Através dos experimentos foi verificado que o sistema operava sem arraste de líquido para as vazões de gás entre 10 e 30 l/min, vazões de líquido entre 0,5 e 2,0 l/min e velocidade de rotação entre 0 e 5000 rpm. Entretanto, para as vazões de ar de 45, 60 e 80 l/min foram observadas elevadas taxas de arraste da fase líquida pela fase gasosa, e comparado ao injetor01, o injetor02 apresentou um desempenho hidrodinâmico inferior. Nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 são apresentadas as taxas de arraste encontradas para o injetor01.

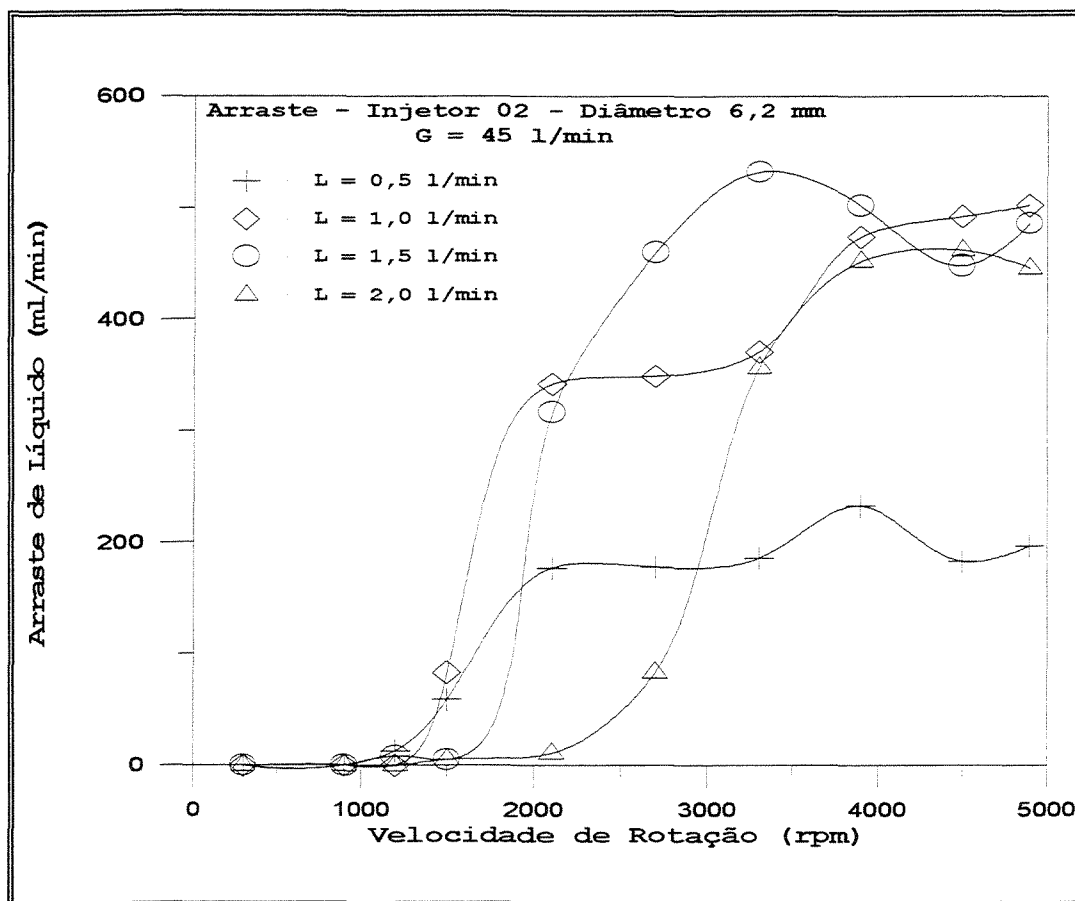


Figura 4.3: Arraste de Líquido para Injetor02, G= 45 l/min.

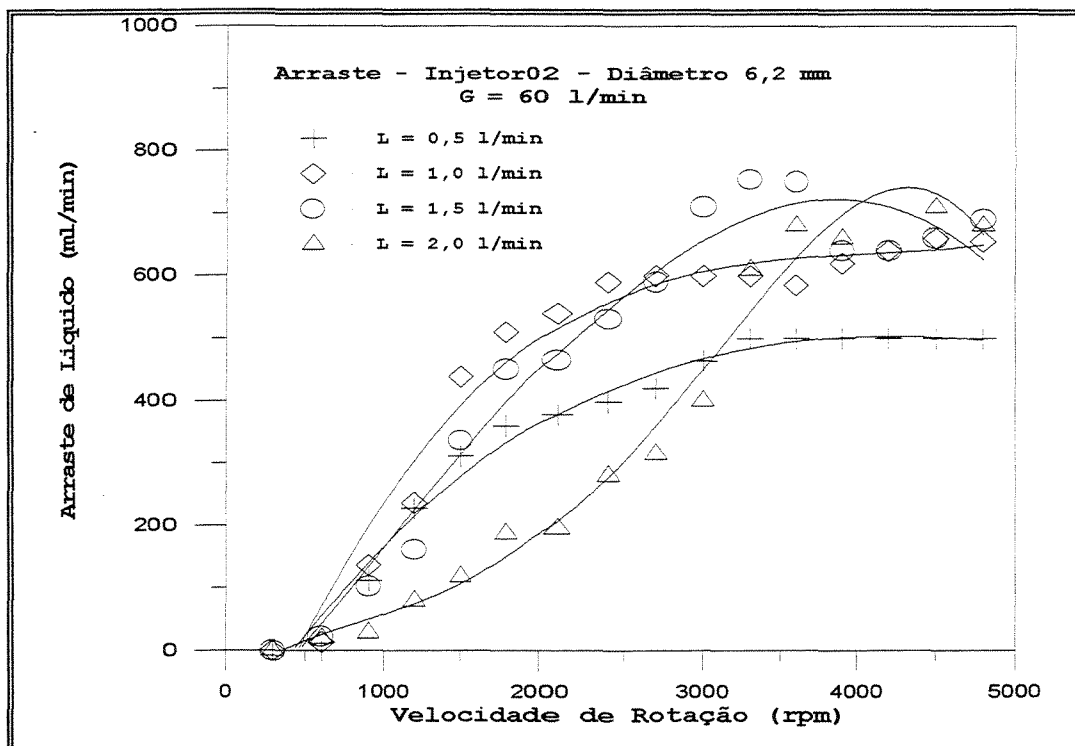


Figura 4.4: Arraste de Líquido para Injetor02, G= 60 l/min.

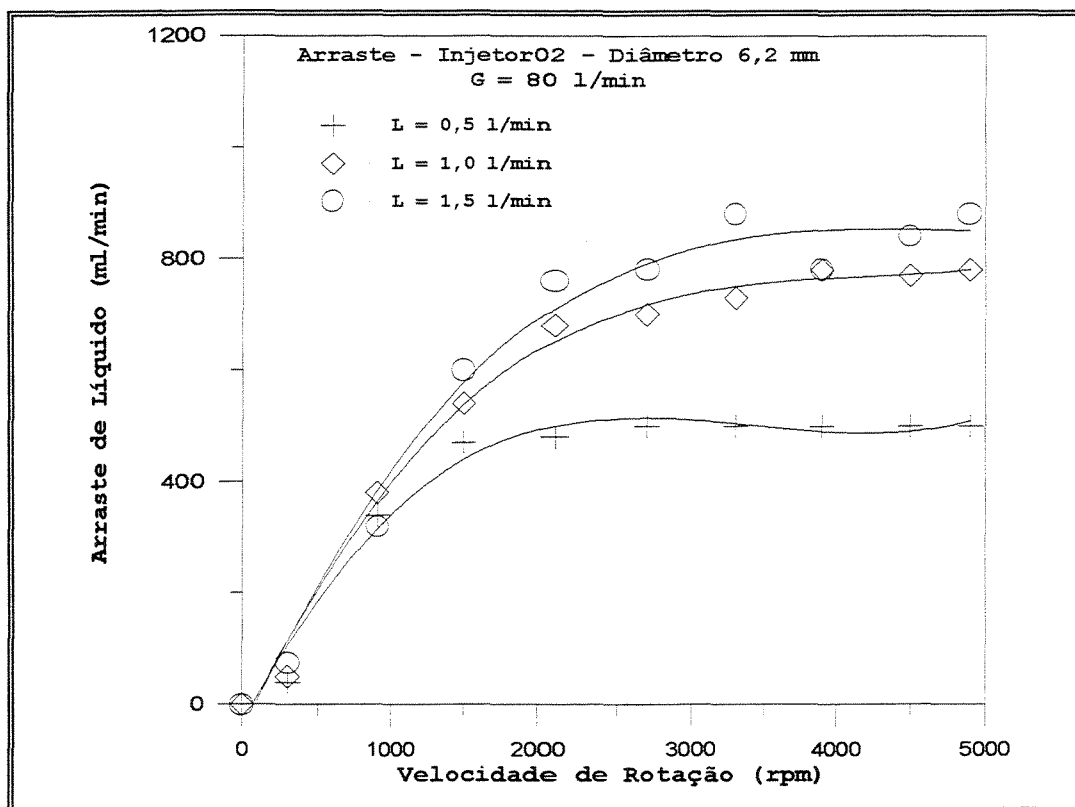


Figura 4.5: Arraste de líquido para Injetor02, G= 80 l/min.

Para o experimento em que foi utilizado 80 l/min de ar não foi possível injetar 2,0 l/min de líquido, o sistema apresentou-se altamente turbulento e impossibilitou medidas de queda de pressão ou taxa de arraste para esta vazão de líquido.

#### 4.1.1.3 - Resultados Injetor03 (diâmetro 3,0 mm)

Dentre os injetores testados, o injetor03 foi o de menor diâmetro, e propiciou a injeção da fase líquida com velocidade maior do que a obtida para os outros injetores. Foram realizados experimentos equivalentes aos realizados para os outros recheios, e estão descritos no Apêndice A.

Através dos experimentos, foi verificado que para o injetor03 foi observado arraste de líquido somente para a vazão de gás de 80 l/min, entretanto, a uma taxa bem menor, se comparada aos outros dois injetores. A Figura 4.6 mostra o arraste ocorrido para o injetor03.

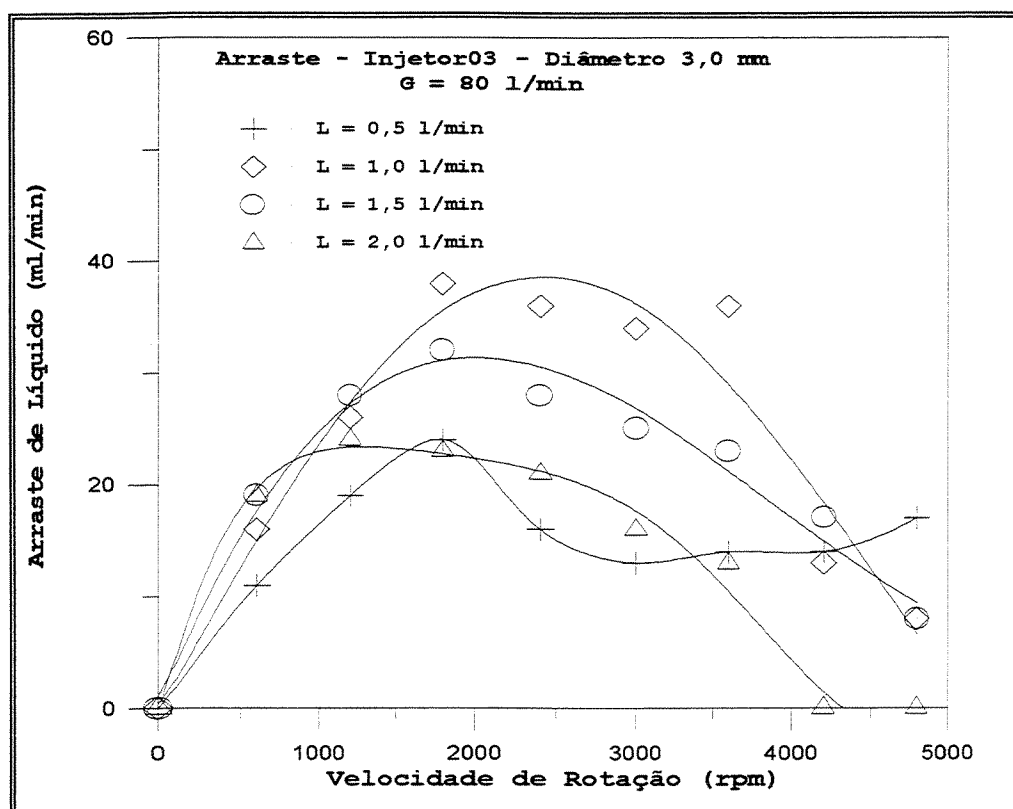


Figura 4.6: Arraste de Líquido para Injetor03, G= 80 l/min.

A Tabela 4.1 apresenta uma análise da faixa de operação livre de arraste para os três injetores, sendo que a partir desta tabela em conjunto com as Figuras 4.1 a 4.6 foi determinado o injetor adequado para o equipamento.

Tabela 4.1 – Faixa de Operação sem Arraste de Líquido.

| Injetor                           | Vazão de Ar<br>(l/min) | Vazão Líquido<br>(l/min) | Veloc. Rotação<br>(rpm) |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 01 ( $\varnothing=4,5\text{mm}$ ) | 10-45                  | 0,5-2,0                  | 0-5000                  |
| 02 ( $\varnothing=6,2\text{mm}$ ) | 10-30                  | 0,5-2,0                  | 0-5000                  |
| 03 ( $\varnothing=3,0\text{mm}$ ) | 10-60                  | 0,5-2,0                  | 0-5000                  |

Através dos dados apresentados pelos experimentos verificou-se que o injetor03 foi o que apresentou maior faixa de operação sem arraste de líquido, e para a vazão de ar de 80l/min, onde ocorreu arraste, a taxa foi reduzida, se comparada às obtidas para os injetores 01 e 02, e devido a estas vantagens este injetor foi escolhido para os experimentos. Através destes experimentos, pode ser verificada a importância da velocidade de injeção do líquido no equipamento centrífugo, haja visto que o injetor03, de menor área transversal de escoamento, é o que apresenta maior velocidade de injeção para uma dada vazão de líquido.

#### 4.1.2 – Comportamento Hidrodinâmico do Leito de Recheio Centrífugo

Depois de ter sido avaliado o mecanismo de injeção da fase líquida, realizou-se a verificação das condições hidrodinâmicas do equipamento operando com os recheios descritos na seção 3.1.7.

Para cada tipo de recheio foram avaliados a queda de pressão e o arraste de líquido, tendo como objetivo a determinação da região de operação onde não ocorria arraste da fase líquida pela fase gasosa, faixa em que seria operado o equipamento para os experimentos de transferência de massa.

Quanto ao arraste da fase líquida pela fase gasosa, a faixa de operação estável para os recheios é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Faixa de Operação Estável.

| Recheio   | Vazão Líquido (l/min) | Vazão Ar (l/min) | Rotação (rpm) |
|-----------|-----------------------|------------------|---------------|
| Rasch. 01 | 0,5 – 2,0             | 20 – 60          | 0 – 5000      |
| Rasch. 02 | 0,5 – 2,0             | 20 – 60          | 0 – 5000      |
| Rasch. 03 | 0,5 – 2,0             | 20 – 60          | 0 – 5000      |
| Wire 04   | 0,5 – 1,5             | 30 – 60          | 0 – 5000      |

Baseado na Tabela 4.2, foram determinadas as vazões em que seriam realizados os experimentos de transferência de massa, sendo as vazões de ar 30, 45 e 60 l/min, as vazões de água 0,5; 1,0 e 1,5 l/min e velocidade de rotação entre 0 e 5000 rpm.

Para os recheios 01, 02 e 03, operando-se a uma taxa de 80 l/min foi observada a presença de arraste para as vazões de água utilizadas, em pelo menos parte da faixa de velocidade de rotação, como é mostrado nas Figuras 4.7 à 4.9.

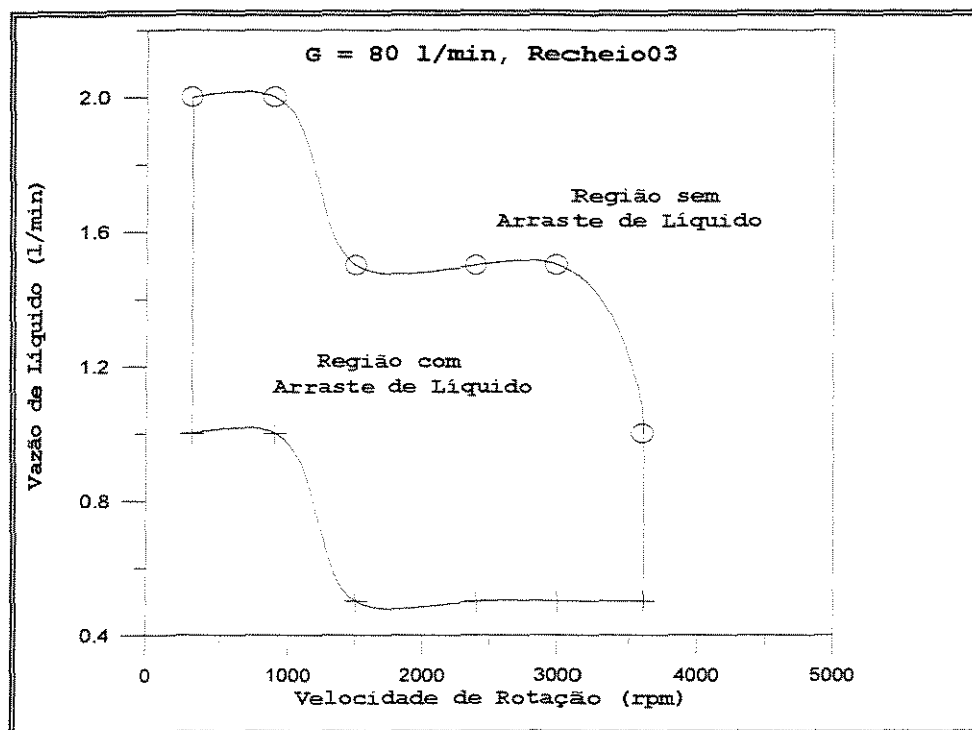


Figura 4.7: Arraste de Líquido para Recheio 03.

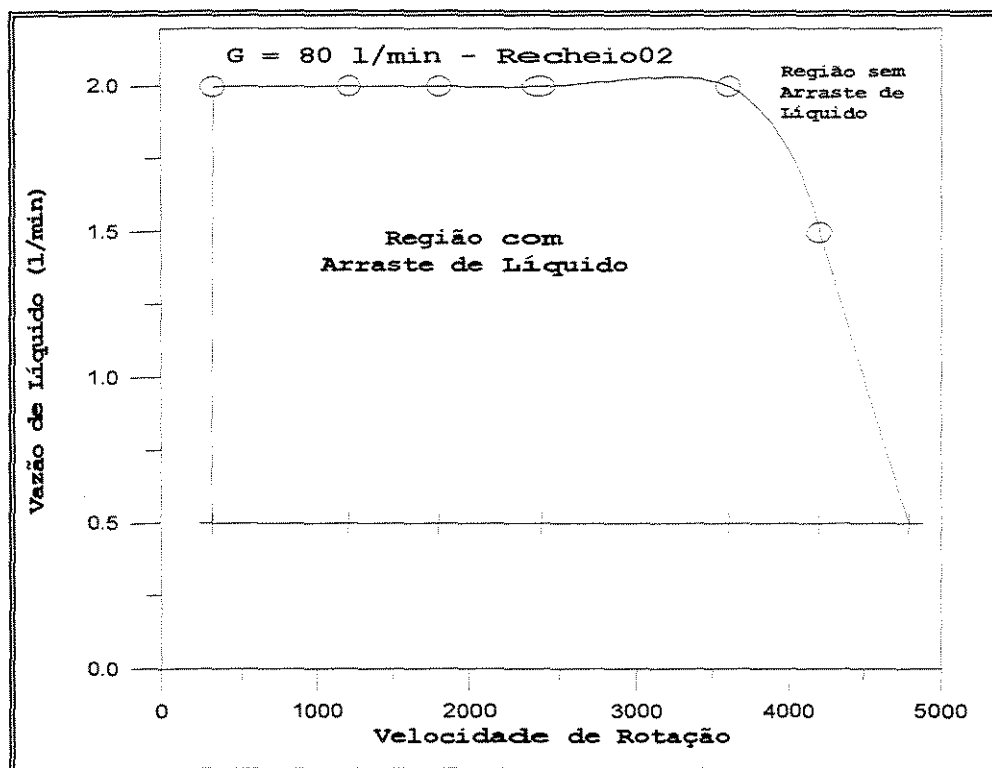


Figura 4.8: Arraste de Líquido para Recheio 02.

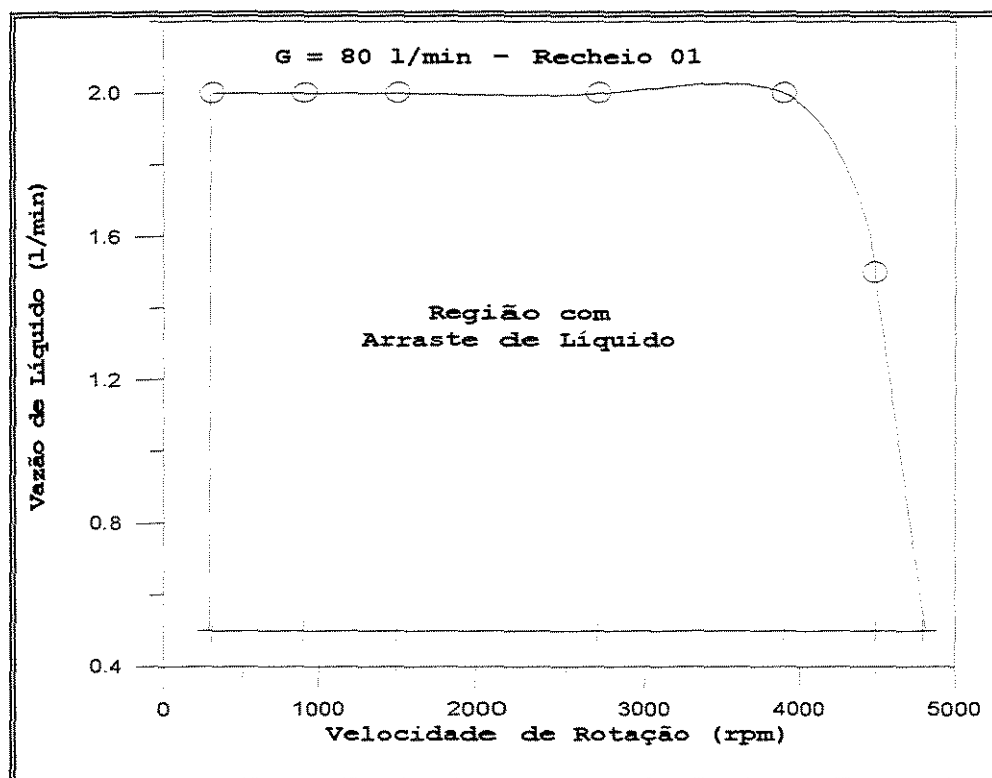


Figura 4.9: Arraste de Líquido para Recheio 01.



Pode ser verificado através das Figuras 4.7 à 4.9 que o arraste de líquido foi mais pronunciado para os recheios 01 e 02 que são menos porosos que o recheio 03. Também pode ser observado que mesmo para a vazão de ar de 80 l/min há uma região em que o equipamento pode ser operado, para os recheios 01, 02 e 03, sem a ocorrência de arraste da fase líquida.

Em relação ao recheio 04, wire mesh, não foi detectado arraste de líquido pela corrente gasosa, operando o leito à velocidade de rotação entre 0 e 5000 rpm, vazão de ar entre 30 e 60 l/min e vazão de líquido entre 0,5 e 1,5 l/min.

A queda de pressão no leito foi analisada para os quatro tipos de recheio, sendo que verificou-se que esta propriedade era função da velocidade de rotação, da vazão de ar e do tipo de recheio utilizado no leito centrífugo.

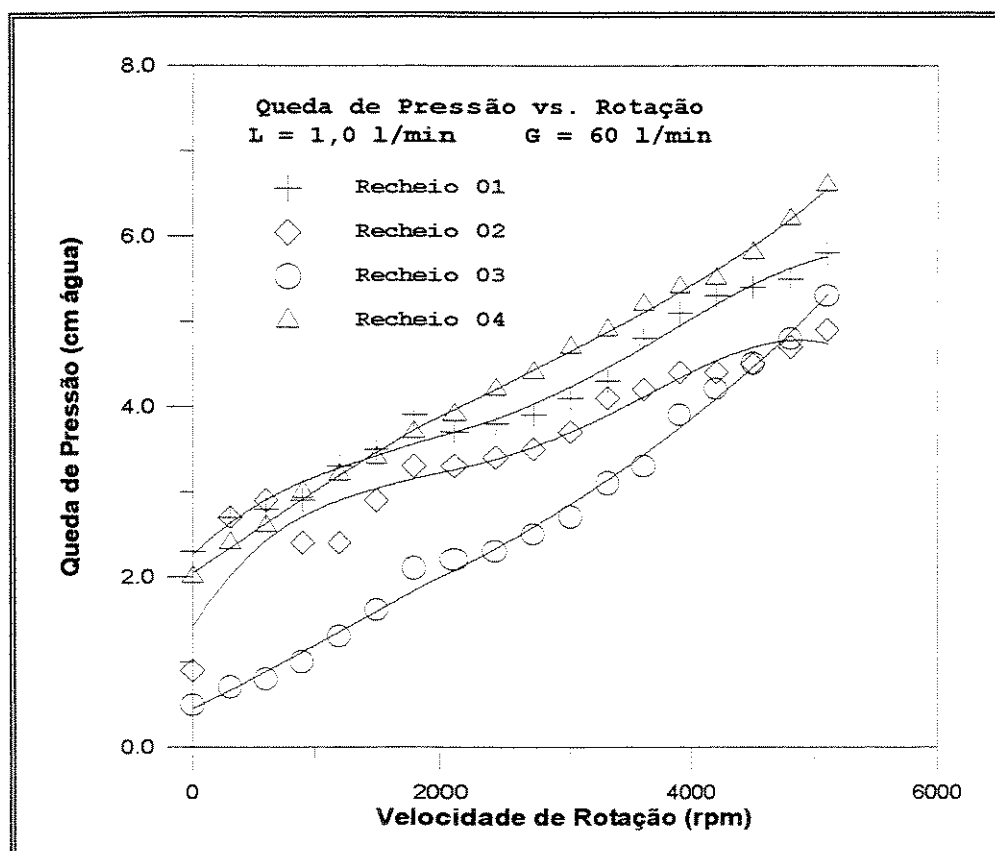


Figura 4.10 - Queda de Pressão no Leito Centrífugo.

Por meio da Figura 4.10, pode ser verificado que a queda de pressão no leito centrífugo é diretamente proporcional a velocidade de rotação, e além disso, também pode ser verificado que para os recheios 01, 02 e 03 (anéis de Raschig) a queda de pressão foi mais intensa para os recheios de menor porosidade, como acontece no caso das colunas convencionais de absorção/dessorção. As conclusões tomadas a partir da Figura 4.10 foram verificadas para toda a faixa operacional testada.

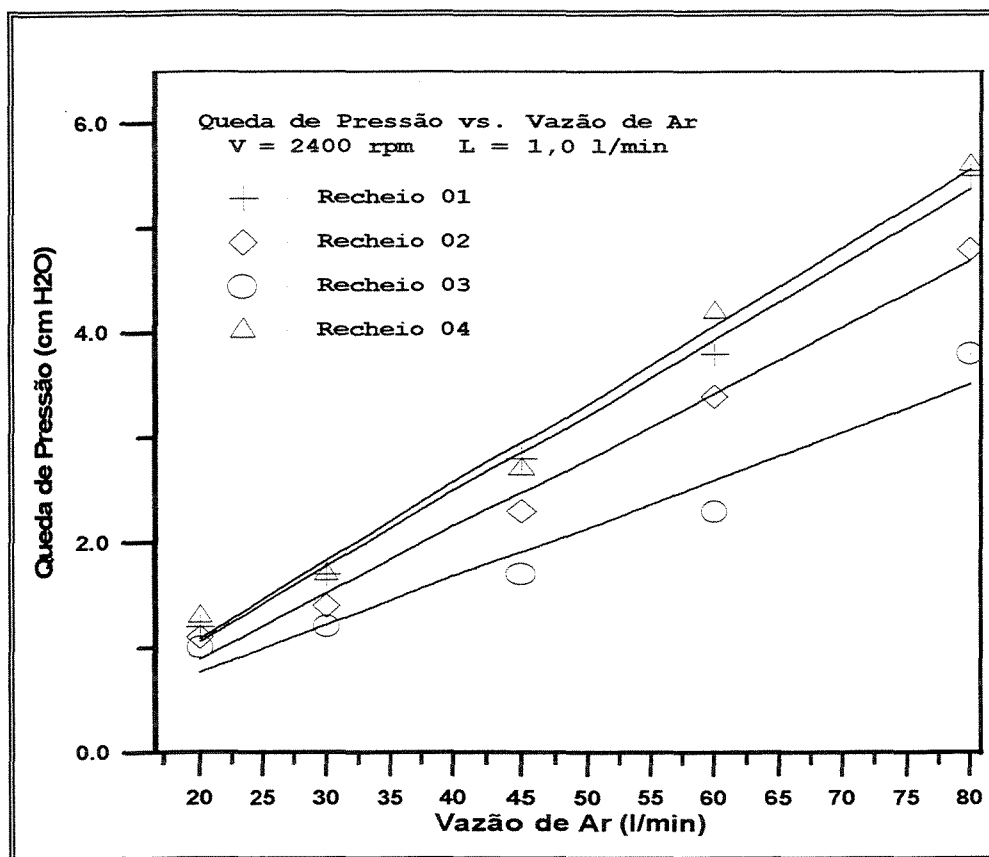


Figura 4.11 - Efeito da Vazão de Ar na Queda de Pressão.

A queda de pressão para o leito centrífugo foi verificada, também, ser função da vazão de ar, sendo que para os recheios 01 e 02, de menor porosidade, e para o recheio 04, wire mesh, a relação entre as duas propriedades mostrou-se de maior intensidade, como pode ser verificado pela Figura 4.11. Em relação a vazão de líquido, a variação da queda de pressão no leito em relação a esta variável mostrou-se desprezível se comparada aos efeitos da vazão de ar, como pode ser exemplificado por meio da Figura 4.12.

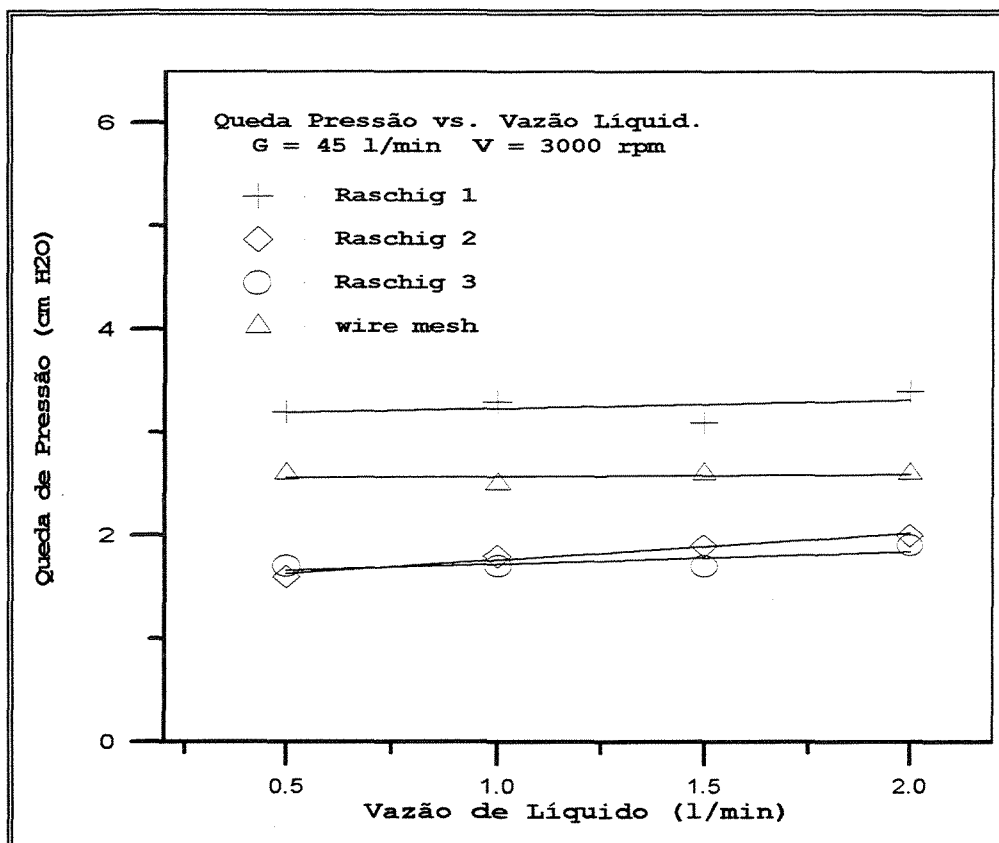


Figura 4.12: Efeito da Vazão de Líquido na Queda de Pressão.

#### 4.2 – Transferência de Massa

Esta fase do trabalho constituiu-se de 3 etapas- (1) determinação dos coeficientes experimentais de transferência de massa para o leito centrífugo, (2) determinação de uma correlação empírica baseada nos dados obtidos experimentalmente e (3) comparação entre os equipamentos centrífugos e convencionais.

##### 4.2.1 – Determinação dos Coeficientes de Transferência de Massa para o Leito Centrífugo.

A metodologia experimental para determinação dos coeficientes globais de transferência de massa, apresentada na seção 3.3.2.1, foi utilizada para todos os recheios operando o equipamento de acordo com a faixa de operação estável, determinada na etapa hidrodinâmica do trabalho.

Além dos experimentos com recheio, foram realizados experimentos de transferência de massa operando com o leito sem recheio, permitindo desta forma avaliar a influência do enchimento no desempenho de transferência do equipamento. As planilhas correspondentes aos experimentos de transferência de massa encontram-se listadas no Apêndice B deste trabalho.

A partir deste ponto do trabalho as vazões das fases, até aqui apresentadas como vazões volumétricas, serão mencionadas como vazões mássicas determinadas em relação a área média de escoamento, apresentadas na Tabela 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 – Relações de Unidades.

| Vazão de Ar (l/min) | Vazão de Ar ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ ) |
|---------------------|------------------------------------------|
| 30                  | 0,0864                                   |
| 45                  | 0,1300                                   |
| 60                  | 0,1730                                   |

Tabela 4.4 – Relações de Unidades.

| Vazão de Líquido (l/min) | Vazão de Líquido ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ ) |
|--------------------------|-----------------------------------------------|
| 0,5                      | 1,31                                          |
| 1,0                      | 2,62                                          |
| 1,5                      | 3,94                                          |

Os resultados finais concernentes aos experimentos de transferência de massa são apresentados nas Tabela 4.5 a 4.7. A partir destas tabelas foram elaborados os gráficos apresentados no presente tópico, a partir dos quais foi efetuada a avaliação do desempenho do equipamento em relação à transferência de massa.

Tabela 4.5: Coeficientes de Transferência de Massa,  $G = 30$  l/min ( $0,0864$  kg/(m<sup>2</sup> .s)).

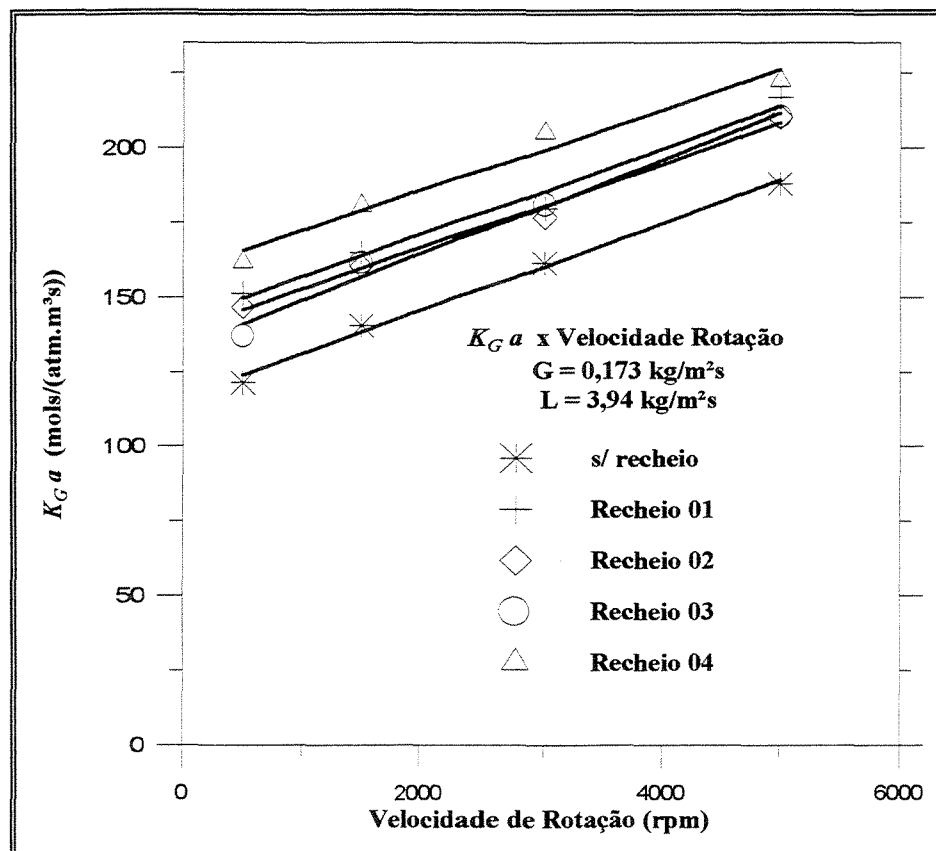
| Vazão de Líquido                         | rotação | $K_{Ga}$ [mols/(atm.m <sup>3</sup> .s)] |          |          |          |         |
|------------------------------------------|---------|-----------------------------------------|----------|----------|----------|---------|
|                                          | (rpm)   | s/ recheio                              | rech. 01 | rech. 02 | rech. 03 | wire 04 |
| 0,5 l/min<br>1,31 kg/(m <sup>2</sup> .s) | 500     | 44,04                                   | 40,30    | 42,75    | 42,92    | 54,43   |
|                                          | 1500    | 48,23                                   | 53,90    | 51,21    | 51,50    | 67,51   |
|                                          | 3000    | 61,43                                   | 58,32    | 60,31    | 65,78    | 79,36   |
|                                          | 5000    | 68,45                                   | 75,55    | 69,22    | 75,23    | 94,04   |
| 1,0 l/min<br>2,62 kg/(m <sup>2</sup> .s) | 500     | 73,77                                   | 71,20    | 69,88    | 62,46    | 78,12   |
|                                          | 1500    | 86,46                                   | 85,39    | 85,93    | 82,85    | 88,04   |
|                                          | 3000    | 100,79                                  | 98,20    | 102,08   | 101,48   | 105,27  |
|                                          | 5000    | 123,69                                  | 120,72   | 124,12   | 120,70   | 133,78  |
| 1,5 l/min<br>3,94 kg/(m <sup>2</sup> .s) | 500     | 58,22                                   | 85,05    | 86,59    | 79,82    | 82,86   |
|                                          | 1500    | 82,33                                   | 111,6    | 108,26   | 101,3    | 110,44  |
|                                          | 3000    | 104,4                                   | 123,19   | 113,58   | 128,14   | 127,41  |
|                                          | 5000    | 137,92                                  | 146,92   | 156,44   | 148,58   | 161,74  |

Tabela 4.6: Coeficientes de Transferência de Massa,  $G = 45$  l/min ( $0,130$  kg/(m<sup>2</sup>.s)).

| Vazão de Líquido                         | rotação | $K_{Ga}$ [mols/(atm.m <sup>3</sup> .s)] |          |          |          |         |
|------------------------------------------|---------|-----------------------------------------|----------|----------|----------|---------|
|                                          | (rpm)   | s/ recheio                              | rech. 01 | rech. 02 | rech. 03 | wire 04 |
| 0,5 l/min<br>1,31 kg/(m <sup>2</sup> .s) | 500     | 68,51                                   | 68,60    | 61,45    | 52,58    | 74,35   |
|                                          | 1500    | 78,96                                   | 82,09    | 71,58    | 63,62    | 91,77   |
|                                          | 3000    | 89,97                                   | 101,44   | 85,00    | 76,07    | 107,06  |
|                                          | 5000    | 101,79                                  | 114,65   | 93,50    | 87,45    | 120,92  |
| 1,0 l/min<br>2,62 kg/(m <sup>2</sup> .s) | 500     | 88,64                                   | 97,35    | 90,58    | 100,38   | 114,38  |
|                                          | 1500    | 107,57                                  | 110,23   | 102,89   | 113,60   | 125,65  |
|                                          | 3000    | 118,54                                  | 131,52   | 123,14   | 130,14   | 146,5   |
|                                          | 5000    | 138,82                                  | 147,31   | 146,06   | 143,47   | 161,03  |
| 1,5 l/min<br>3,94 kg/(m <sup>2</sup> .s) | 500     | 96,82                                   | 99,21    | 95,69    | 104,10   | 124,57  |
|                                          | 1500    | 128,58                                  | 127,05   | 126,04   | 125,32   | 148,97  |
|                                          | 3000    | 153,70                                  | 146,05   | 153,13   | 160,56   | 182,32  |
|                                          | 5000    | 188,21                                  | 184,94   | 187,08   | 191,66   | 212,13  |

Tabela 4.7: Coeficientes de Transferência de Massa,  $G = 60 \text{ l/min}$  ( $0,173 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ ).

| Vazão de Líquido                                        | rotação | $K_{Ga} [\text{mols}/(\text{atm}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s})]$ |          |          |          |         |
|---------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|---------|
|                                                         | (rpm)   | s/ recheio                                                      | rech. 01 | rech. 02 | rech. 03 | wire 04 |
| 0,5 l/min<br>1,31 $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ | 500     | 65,28                                                           | 72,29    | 74,64    | 77,85    | 86,98   |
|                                                         | 1500    | 85,44                                                           | 85,33    | 91,66    | 92,09    | 103,24  |
|                                                         | 3000    | 100,96                                                          | 105,46   | 105,68   | 107,82   | 118,24  |
|                                                         | 5000    | 121,91                                                          | 118,30   | 123,89   | 120,14   | 140,17  |
| 1,0 l/min<br>2,62 $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ | 500     | 111,01                                                          | 109,80   | 110,41   | 112,77   | 133,84  |
|                                                         | 1500    | 122,96                                                          | 129,22   | 121,84   | 126,76   | 146,87  |
|                                                         | 3000    | 135,52                                                          | 138,93   | 140,07   | 140,97   | 162,76  |
|                                                         | 5000    | 152,87                                                          | 160,96   | 159,78   | 160,83   | 188,32  |
| 1,5 l/min<br>3,94 $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ | 500     | 121,38                                                          | 151,23   | 146,72   | 136,91   | 161,67  |
|                                                         | 1500    | 140,53                                                          | 164,90   | 160,33   | 161,44   | 180,6   |
|                                                         | 3000    | 161,42                                                          | 179,75   | 176,74   | 180,91   | 205,08  |
|                                                         | 5000    | 188,05                                                          | 216,83   | 210,33   | 210,19   | 222,52  |

Figura 4.13: Variação do  $K_{Ga}$  com a Velocidade de Rotação.

Observando a Figura 4.13 pode ser verificado que operando o leito centrífugo com uma vazão de ar de  $0,173 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $60 \text{ l/min}$ ) e vazão de líquido de  $3,94 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $1,5 \text{ l/min}$ ), o coeficiente global de transferência de massa  $K_G a$  é função linear da velocidade de rotação para todos os recheios analisados, inclusive para o leito sem recheio. Além disso, pode ser notado que o recheio 04 (wire mesh), de maior área superficial, foi o que apresentou os maiores valores de  $K_G a$ ; os recheios 01, 02 e 03 (anéis de Raschig), apesar de tamanhos e áreas superficiais diferentes, apresentaram resultados similares. Os menores valores para o coeficiente foram obtidos quando o leito foi operado sem recheio, demonstrando a importância do enchimento no aumento da transferência de massa no equipamento.

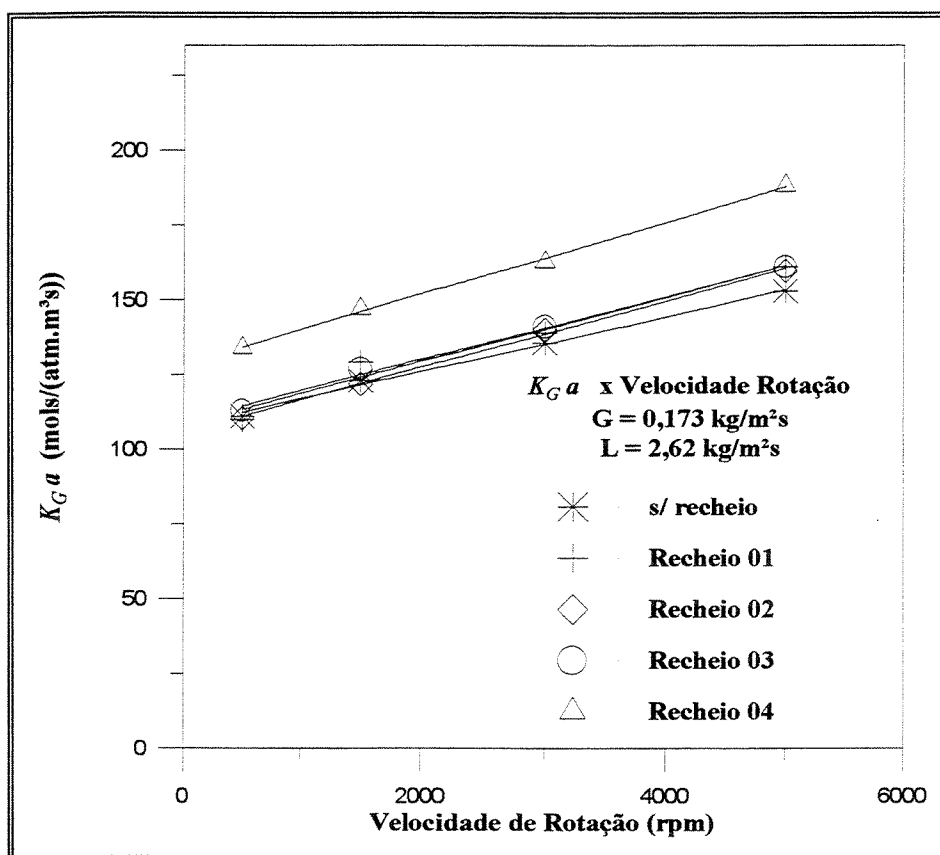


Figura 4.14: Variação do  $K_G a$  com a Velocidade de Rotação.

Para os experimentos apresentados na Figura 4.14, com taxas de escoamento de líquido de  $2,62 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $1,0 \text{ l/min}$ ) e de ar de  $0,173 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $60 \text{ l/min}$ ), além da dependência linear do coeficiente de transferência em relação à velocidade de rotação, pode ser verificado que os

resultados tanto para o leito vazio quanto para os recheios 01, 02 e 03, anéis de Raschig, foram semelhantes, e isto se deve ao fato de que para a vazão de líquido em que foi operado o equipamento, com a rotação era formado um spray fino de líquido favorecendo o contato entre a corrente líquida e a corrente gasosa mesmo para o leito sem recheio. O recheio 04 (wire mesh) foi o único que apresentou resultados diferenciados de transferência de massa em relação as outras configurações estudadas, e isto pode ser explicado pela sua maior área superficial. As mesmas conclusões podem ser verificadas através da Figura 4.15, a qual mostra os resultados experimentais de transferência de massa determinados operando o leito com uma vazão de ar de  $0,173 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $60 \text{ l/min}$ ) e vazão de líquido de  $1,31 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $0,5 \text{ l/min}$ ).

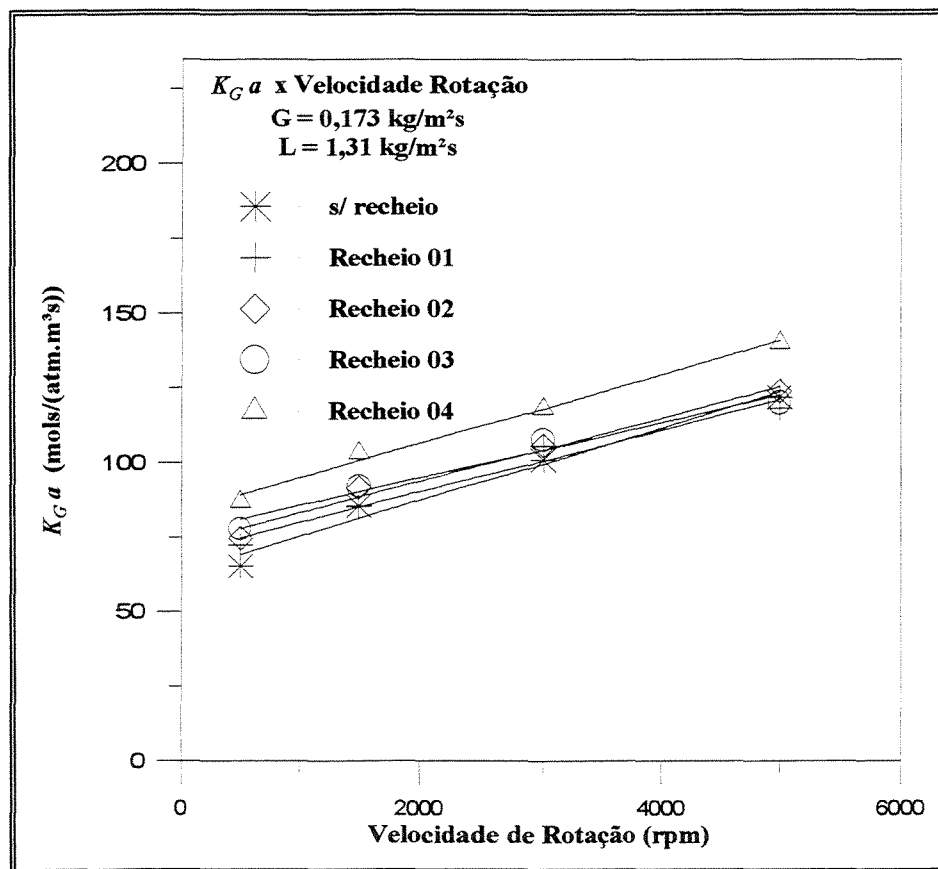


Figura 4.15: Variação do  $K_{Ga}$  com a Velocidade de Rotação.

Os resultados experimentais determinados operando o leito a uma taxa de líquido de  $3,94 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $1,5 \text{ l/min}$ ) e de ar de  $0,130 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $45 \text{ l/min}$ ) podem ser analisados por meio da Figura 4.16. Pode ser verificado que para estas vazões o coeficiente de transferência de massa foi função



linear da velocidade de rotação, e que o recheio 04 foi o que apresentou os maiores valores. As outras configurações apresentaram resultados semelhantes, mostrando que para as vazões estudadas, os recheios 01, 02 e 03 não apresentaram vantagens em relação ao equipamento vazio, e isto pode ser explicado pelo fato de que a fase líquida quando injetada formava um spray fino propiciando o contato entre as fases mesmo para o leito sem recheio.

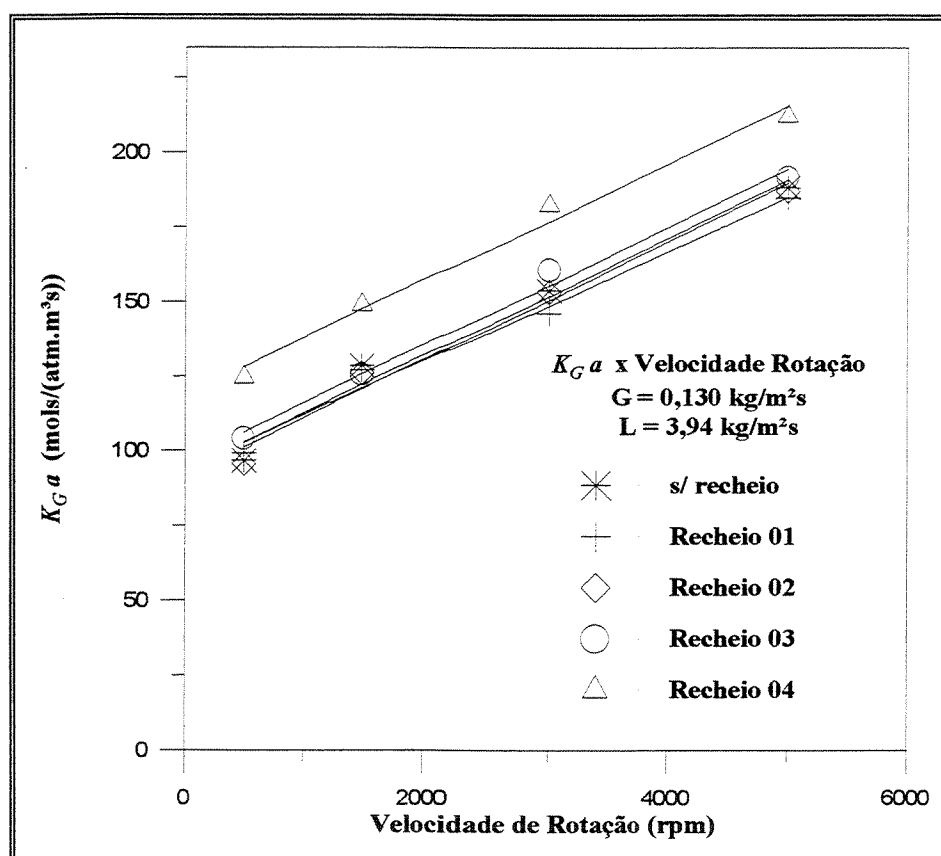
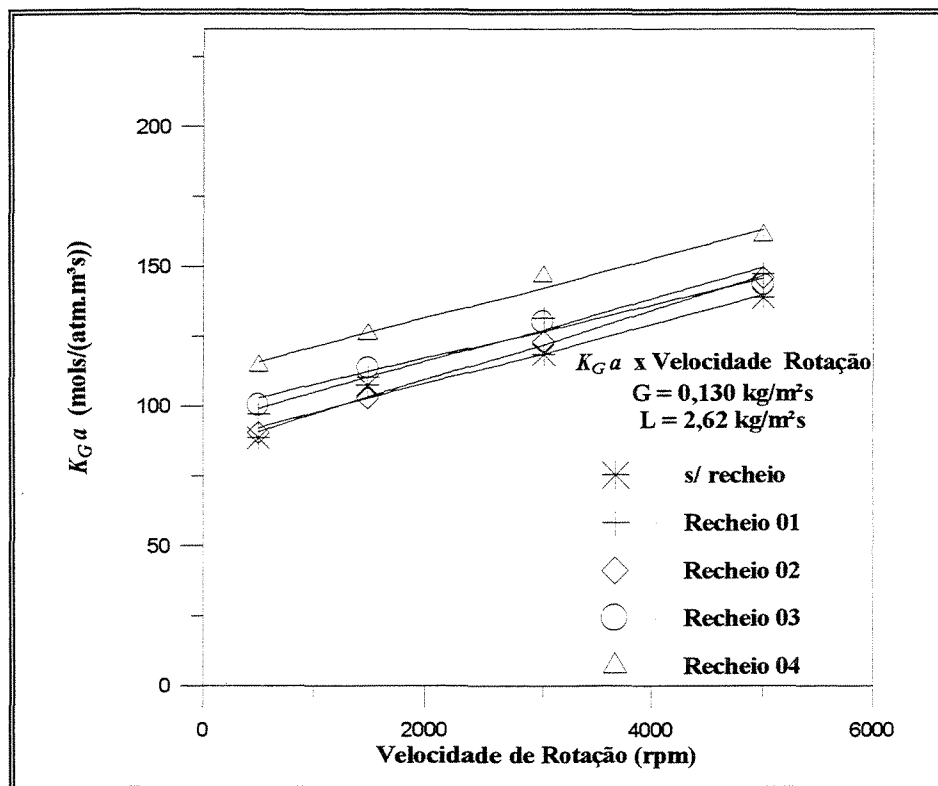
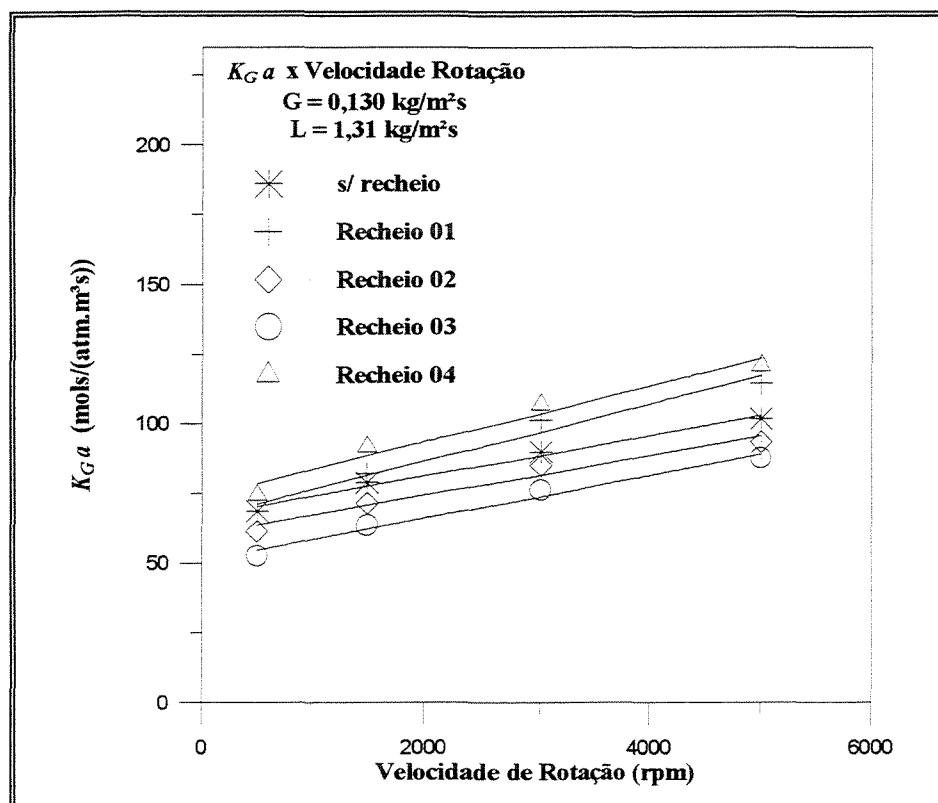


Figura 4.16: Variação do  $K_G a$  com a Velocidade de Rotação.

Em relação aos pontos experimentais descritos na Figura 4.17, obtidos operando o leito centrífugo com vazões de ar de  $0,130 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (45 l/min) e de líquido de  $2,62 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (1,0 l/min), pode ser verificado que também para estas vazões o recheio 04, wire mesh, foi o que apresentou maiores coeficientes globais de transferência de massa. Também pode ser verificado na Figura 4.17 que a diferença de desempenho de transferência entre operar o leito vazio (s/ recheio) ou usar os recheios 01, 02 e 03 não foi significativa.

Figura 4.17: Variação do  $K_G a$  com a Velocidade de Rotação.Figura 4.18: Variação do  $K_G a$  com a Velocidade de Rotação.

Os experimentos realizados, operando o equipamento com vazões de ar de  $0,130 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $45 \text{ l/min}$ ) e de líquido de  $1,31 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $0,5 \text{ l/min}$ ), estão representados na Figura 4.18. Para estas condições experimentais foi observado que operando o leito vazio (sem recheio), os coeficientes de transferência de massa obtidos foram maiores que os valores obtidos para os recheios 02 e 03. Este comportamento pode ser explicado pela baixa vazão de líquido que não molhava todo o recheio, além de que o spray de líquido formado, quando sem recheio, era fino propiciando contato eficiente entre as fases. O coeficiente foi função linear da velocidade de rotação, e os recheios 04 e 01 foram os que apresentaram os maiores valores de transferência.

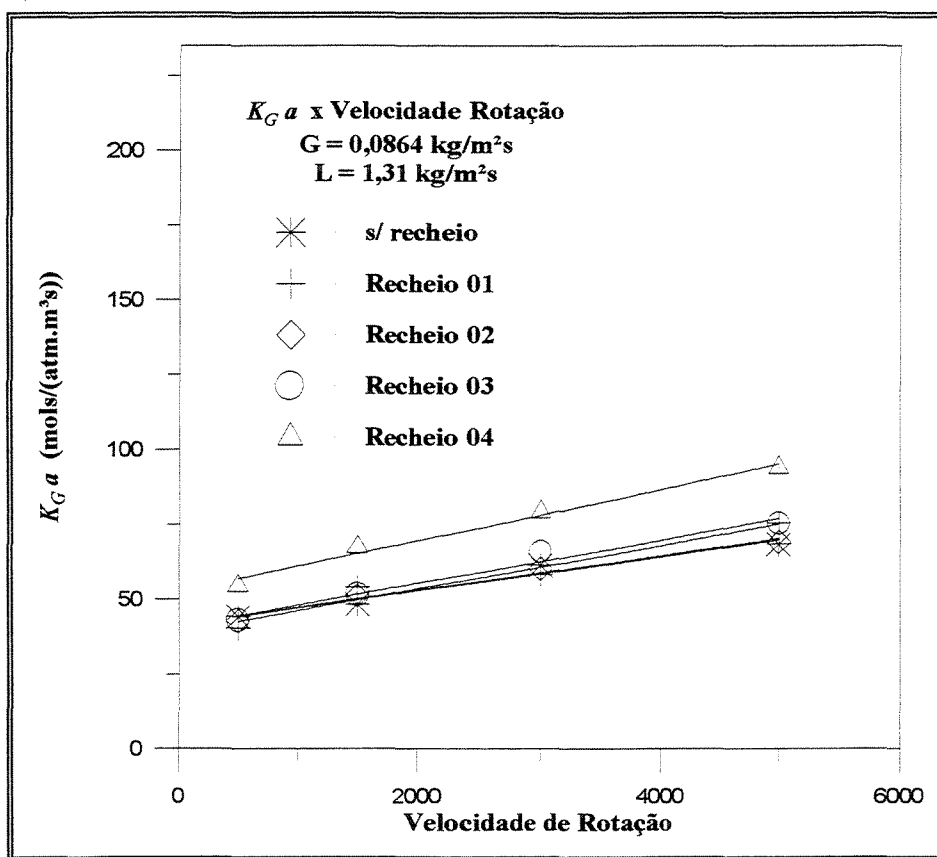


Figura 4.19: Variação do  $K_G a$  com a Velocidade de Rotação.

Os pontos experimentais apresentados na Figura 4.19 foram obtidos operando o leito com as menores vazões testadas, tanto da fase líquida como da fase gasosa, sendo a vazão de ar de  $0,0864 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $30 \text{ l/min}$ ) e de líquido de  $1,31 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $0,5 \text{ l/min}$ ). Pode ser verificado deste gráfico que o coeficiente  $K_G a$  foi função linear da velocidade de rotação, o recheio 04 foi o que

apresentou as maiores taxas de transferência e, além disso, todas as outras configurações testadas apresentaram resultados muito próximos, que podem ser justificados pelo fato da baixa vazão de líquido alimentada no equipamento.

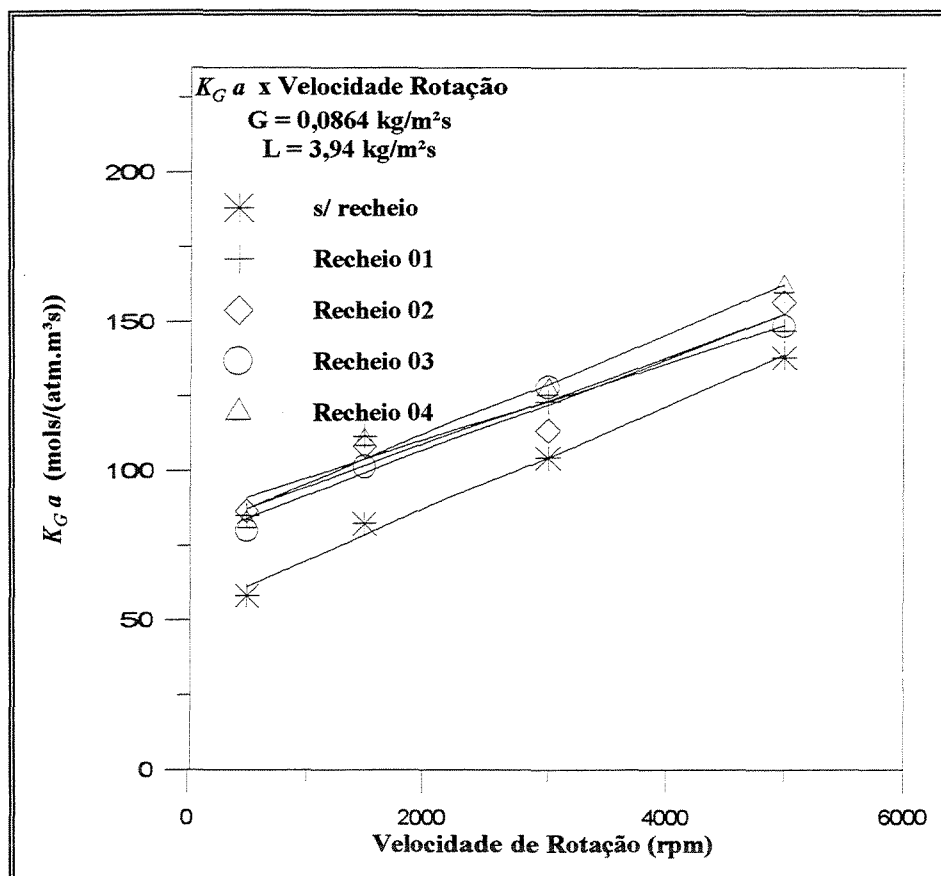


Figura 4.20: Variação do  $K_G a$  com a Velocidade de Rotação.

A Figura 4.20 descreve os pontos experimentais obtidos operando o leito centrífugo com vazões de ar de  $0,0864 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (30 l/min) e de líquido de  $3,94 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (1,5 l/min). Pode ser verificado que todos os recheios apresentaram resultados similares de transferência, o que pode ser justificado pelo fato de que a fase gasosa com baixa vazão foi saturada pela alta vazão da fase líquida; no caso do leito vazio, sem recheio, a fase líquida ao ser injetada no leito concentrou-se na parte inferior do rotor, diminuindo o contato entre as fases e prejudicando a transferência de massa.

Para os experimentos representados graficamente na Figura 4.21 também observou-se a dependência linear do  $K_{Ga}$  com a velocidade de rotação, além disso, o recheio 04 apresentou os melhores resultados de transferência de massa, os outros recheios apresentaram resultados semelhantes de transferência de massa.

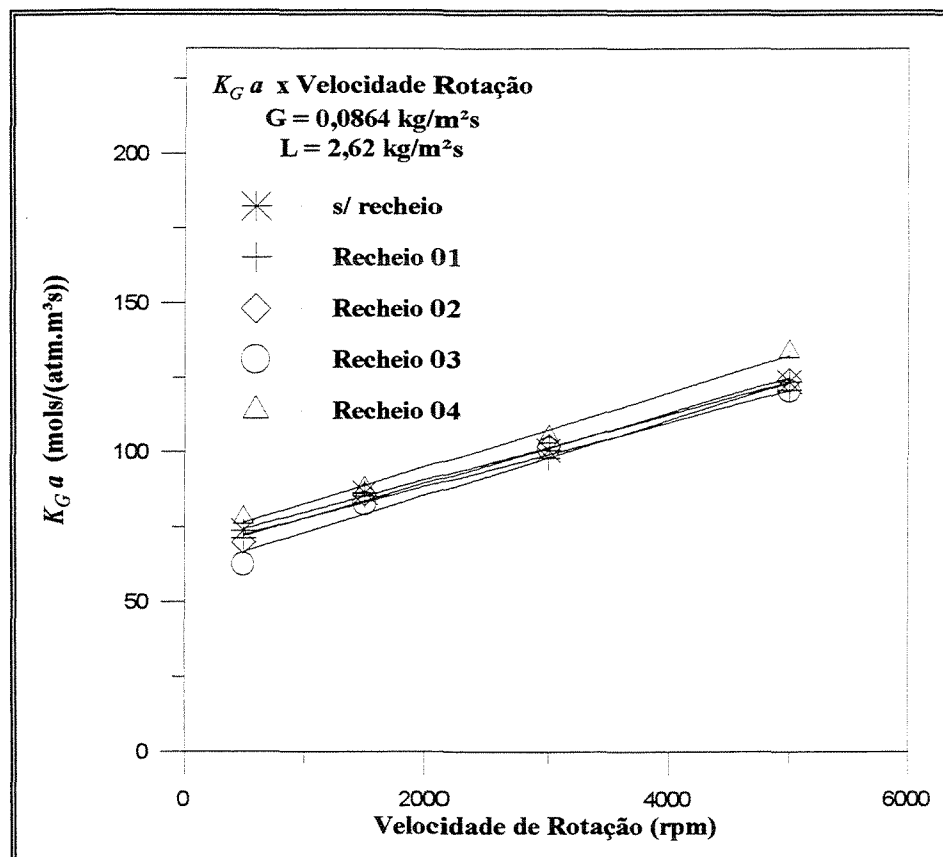


Figura 4.21: Variação do  $K_{Ga}$  com a Velocidade de Rotação.

Basicamente, pode ser observado das Figuras 4.13 à 4.21 que o coeficiente de transferência de massa,  $K_{Ga}$ , é função linear da velocidade de rotação; que o recheio 04, wire mesh, apresentou as maiores taxas de transferência de massa e que mesmo operando com o rotor vazio, sem recheio, o equipamento ainda assim apresenta altas taxas de transferência de massa.

A dependência do coeficiente  $K_{Ga}$  com a vazão de ar no leito pode ser observada na Figura 4.22, que exemplifica através dos resultados verificados para o recheio 04, wire mesh, o que ocorreu para os outros recheios. Como pode ser observado pelo gráfico, o coeficiente  $K_{Ga}$  é

função da vazão de ar e aumenta com o aumento desta variável. Além disso, pode ser verificado também pela Figura 4.22 o efeito da velocidade de rotação no coeficiente de transferência de massa.

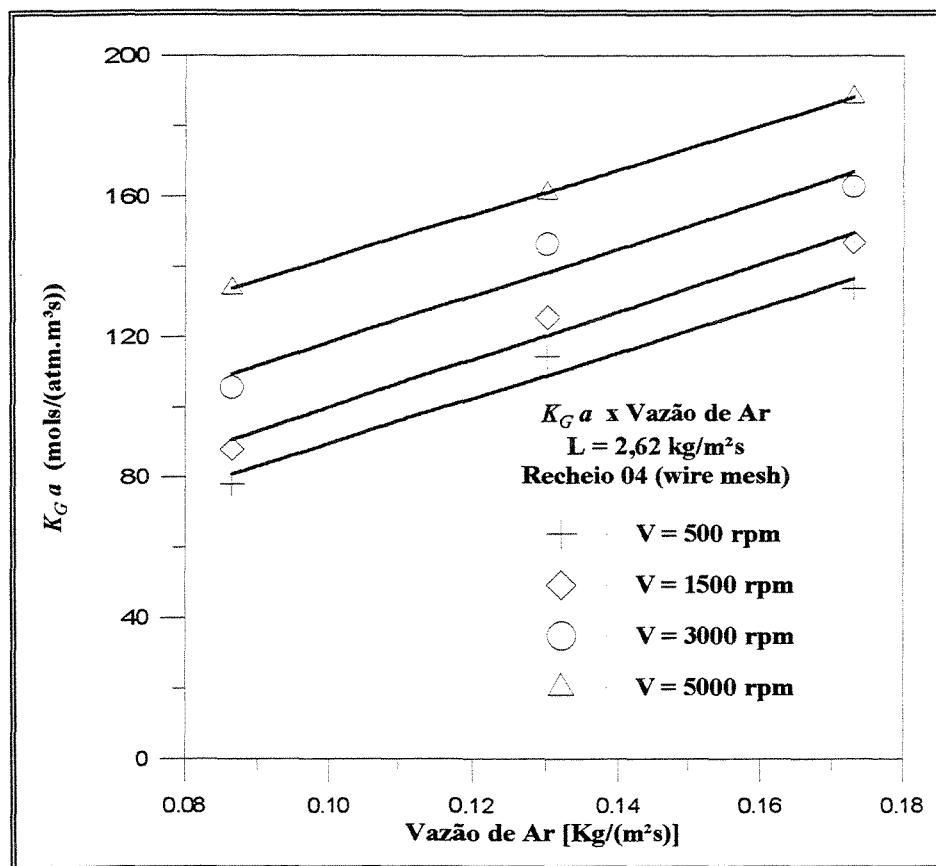
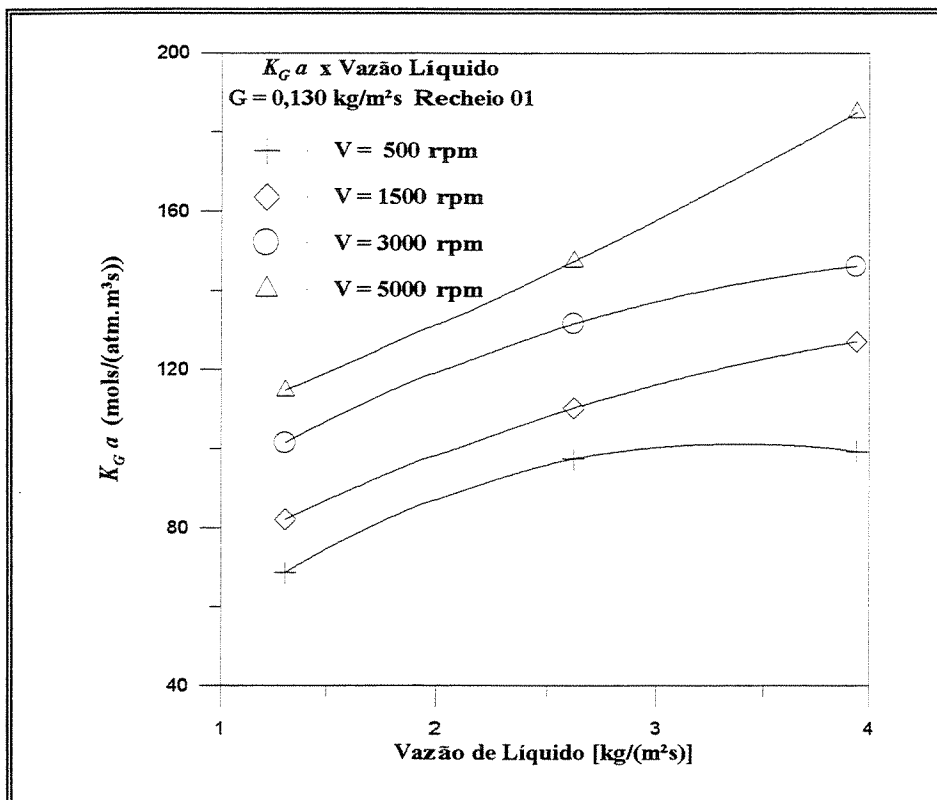
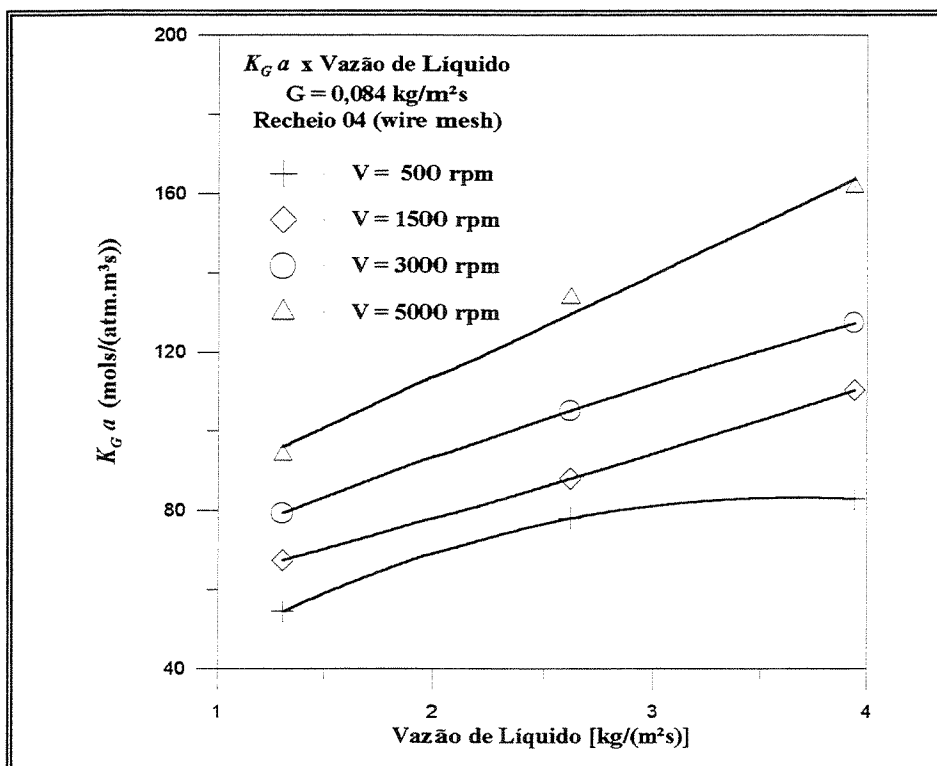


Figura 4.22: Variação do  $K_G a$  com a Vazão de Ar.

A relação entre o coeficiente global de transferência de massa,  $K_G a$ , e a vazão de líquido pode ser visualizada nos pontos experimentais apresentados nas Figuras 4.23 e 4.24. Por meio dessas figuras podemos verificar que o coeficiente de transferência é função da vazão de líquido. O aumento do coeficiente com a vazão de líquido diminui à medida que a relação fase líquida/fase gasosa aumenta, tendendo a alcançar um ponto limite onde mesmo com o aumento da vazão da fase líquida não ocorre aumento do coeficiente, isto pode ser explicado pelo fato do solvente, fase gasosa, saturar-se do soluto proveniente da fase líquida.

Figura 4.23: Variação do  $K_G a$  com a Vazão de Líquido.Figura 4.24: Variação do  $K_G a$  com a Vazão de Líquido.

#### 4.2.2 – Determinação da Correlação Empírica para o Coeficiente de Transferência de Massa.

Através das análises dos resultados apresentados pelos experimentos, verificou-se que o coeficiente global de transferência de massa foi dependente dos parâmetros vazão de gás, vazão de líquido, área superficial do recheio, diâmetro do recheio e aceleração centrífuga, além disso, convém salientar que os experimentos foram realizados à temperatura constante, o que nos leva a concluir que o  $K_G a$  também pode ser função desta variável. Na determinação da correlação também foram analisadas as variáveis densidade e viscosidade das fases líquida e gasosa, além da difusividade do soluto na fase gasosa.

Os dados experimentais foram analisados em relação aos números adimensionais  $Re_G$ ,  $Re_L$  e  $Gr_G$ , os quais contêm em suas estruturas os parâmetros tomados como referência no desenvolvimento da correlação empírica correspondente à equação 4.1, que foi proposta por Liu e colaboradores (1996) para um equipamento centrífugo análogo ao desenvolvido neste trabalho.

$$\frac{K_G a R T}{D_G a_p} = k_1 * Re_G^{k_2} * Re_L^{k_3} * Gr_G^{k_4} \quad (4.1)$$

$$Gr_G = \frac{d_p^3 a_c}{\nu_G^2} \quad (4.2)$$

$$Re_G = \frac{G^i}{a_p \mu_G} \quad (4.3)$$

$$Re_L = \frac{L^i}{a_p \mu_L} \quad (4.4)$$



Os parâmetros  $G^i$  e  $L^i$  são relacionados aos fluxos mássicos em relação à área média de escoamento do leito de recheio  $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ . As constantes  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$ , apresentadas na equação 4.1, foram ajustadas através do Método dos Mínimos Quadrados.

$$\frac{K_G a RT}{D_G a_p} = 1840,90 * \text{Re}_G^{0,669} * \text{Re}_L^{0,547} * Gr_G^{0,089} \quad (4.5)$$

O ajuste dos dados experimentais resultou na equação 4.5, cujo coeficiente de correlação ( $R^2$ ) corresponde a 0,9154, com erro máximo de predição de 11,26%. Os parâmetros utilizados nesta correlação situaram-se nas faixas  $8,1231 < \text{Re}_G < 21,9184$ ;  $2,1839 < \text{Re}_L < 8,7922$ ;  $91,749.10^3 < Gr_G < 46,223.10^6$  e  $33,99.10^3 < K_G a RT / D_G a_p^2 < 207,36.10^3$ . A dependência entre o  $K_G a$  e a aceleração centrífuga foi na potência 0,089 que é menor que a encontrada por Liu e colaboradores (1996) que foi de 0,25, sendo que os números adimensionais correlacionados por Liu situavam-se fora da faixa correspondente aos analisados pela equação 4.5.

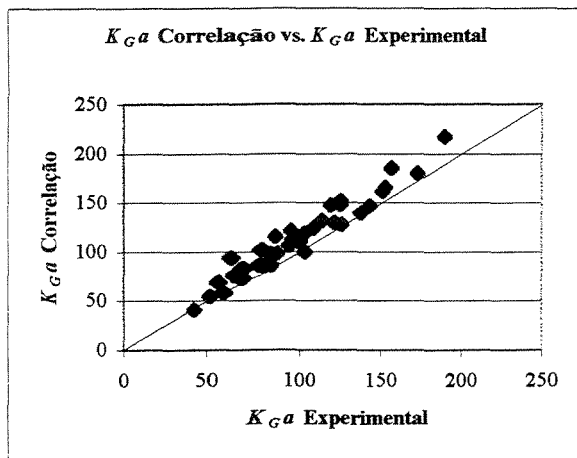


Figura 4.25:  $K_G a$  Correl. vs.  $K_G a$  Exp. Recheio 01.

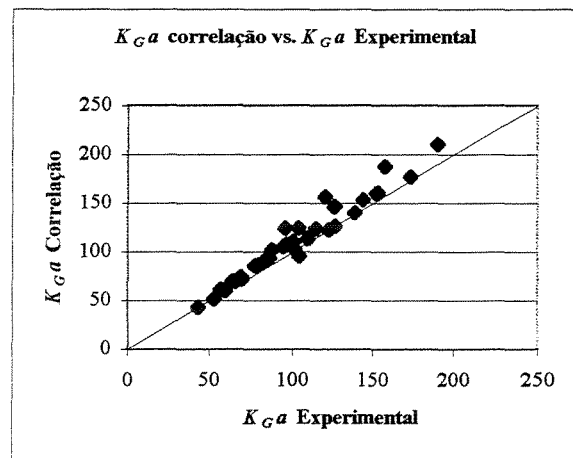
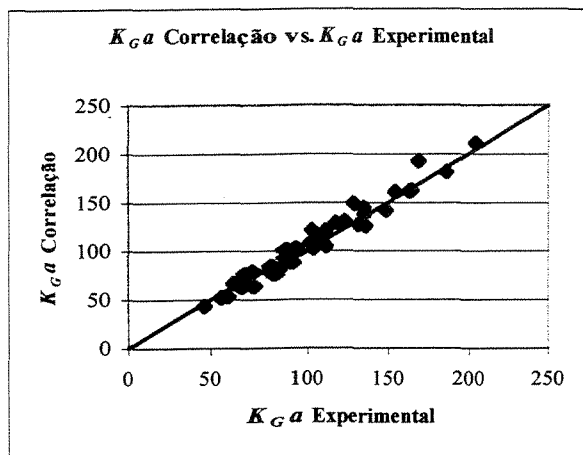
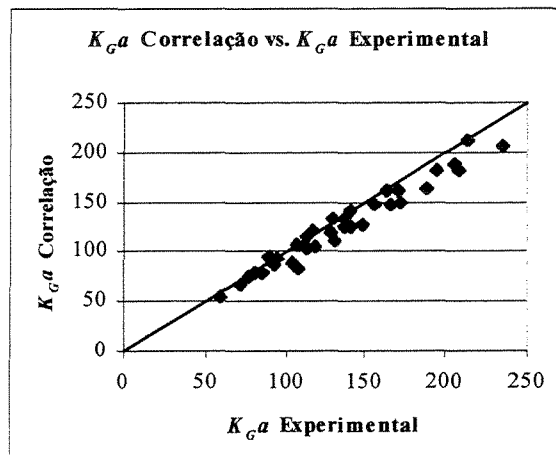


Figura 4.26:  $K_G a$  Correl. vs.  $K_G a$  Exp. Recheio 02.

As Figuras 4.25 a 4.28 mostram a concordância dos valores de  $K_G a$  obtidos experimentalmente com os valores preditos pela correlação empírica dada pela equação 4.5 para os quatro recheios estudados. Pode ser verificado nas referidas figuras que a correlação empírica prediz com boa precisão os coeficientes globais de transferência de massa  $K_G a$  para todas as configurações estudadas.

Figura 4.27:  $K_{Ga}$  Correl. vs.  $K_{Ga}$  Exp. Recheio 03.Figura 4.28:  $K_{Ga}$  Correl. vs.  $K_{Ga}$  Exp. Recheio 04.

#### 4.2.3 – Avaliação Comparativa entre Equipamentos Centrífugos e Leitos Convencionais.

Primeiramente foram calculados, através das correlações de Onda (1968), os coeficientes globais volumétricos de transferência de massa  $K_{Ga}$  para torres de recheio convencionais operando com as vazões similares as utilizadas no leito centrífugo.

A Figura 4.29 apresenta uma comparação entre os coeficientes obtidos experimentalmente para o leito centrífugo e os calculados para o leito convencional para os recheios 01 e 03, estando ambos com vazões de ar de  $0,0864 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , e o leito centrífugo a uma velocidade de 1500 rpm. Pode ser visualizado neste gráfico que os coeficientes obtidos para o leito centrífugo equivalem de 3 a 4 vezes o valor obtido para o leito convencional, além disso, pode ser verificado que a influência da vazão de líquido no  $K_{Ga}$  é muito mais pronunciada para o leito centrífugo do que para o leito convencional.

A comparação entre a dependência do  $K_{Ga}$  com a vazão de ar para os leitos convencionais e os leitos centrífugos pode ser visualizada na Figura 4.30. Neste gráfico também pode ser verificado que os coeficientes obtidos para o leito centrífugo corresponderam a aproximadamente 4 vezes os valores calculados para o leito convencional.

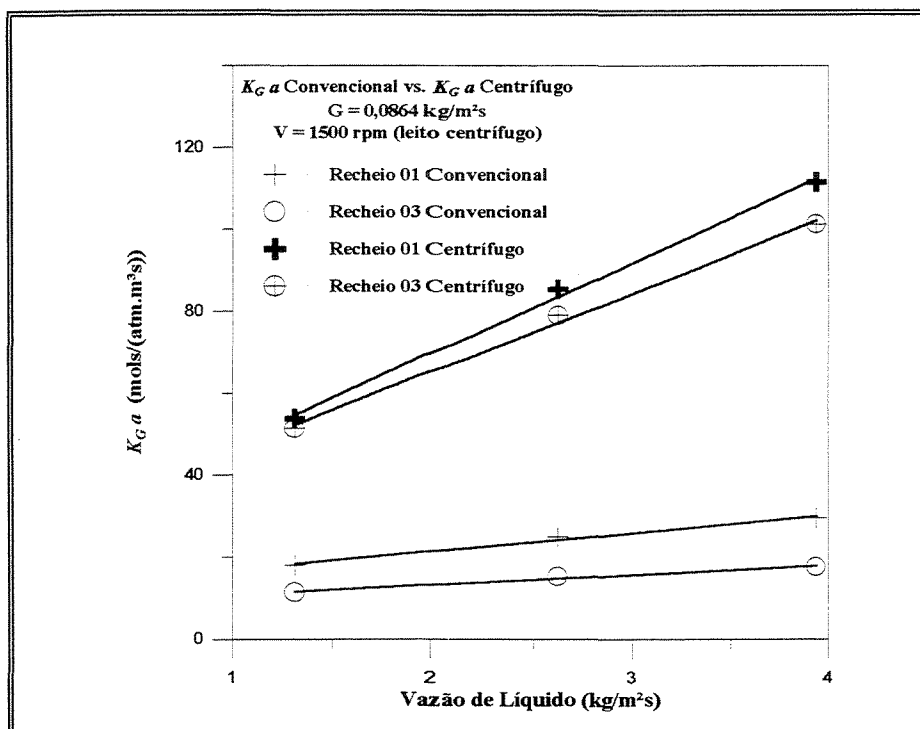


Figura 4.29: Comparação entre  $K_{Ga}$  Convencional e  $K_{Ga}$  Centrífugo.

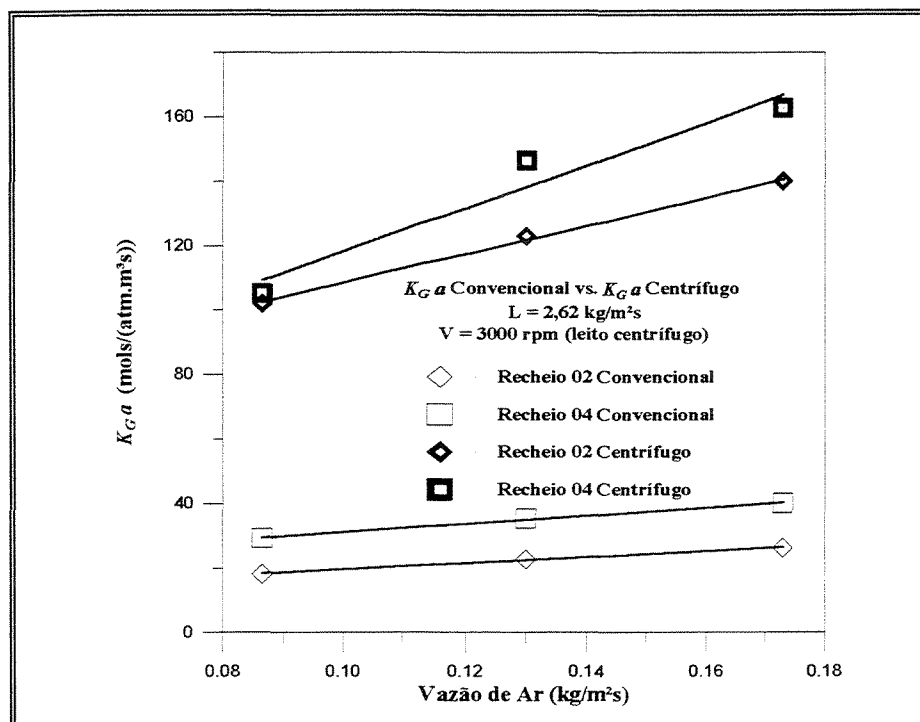


Figura 4.30: Comparação entre  $K_{Ga}$  Convencional e  $K_{Ga}$  Centrífugo.

O desempenho do equipamento centrífugo também foi comparado ao convencional em relação ao volume do equipamento, tomando-se como referência o volume do leito de recheio necessário em um equipamento convencional para realizar uma determinada separação obtida experimentalmente no leito centrífugo. O volume do equipamento convencional foi determinado através do conceito de unidades globais de transferência, abordado no item 3.3.2.5, em conjunto com a correlação de Eckert (1970), utilizada no dimensionamento da área de escoamento das fases.

Operando-se o leito centrífugo com recheio 01, anéis de Raschig, e vazões de líquido de 1,0 l/min e de ar de 45 l/min foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.8, na tabela também são apresentados os volumes de leitos convencionais calculados, necessários à realização da mesma separação. O equipamento centrífugo testado neste trabalho era constituído de um leito de recheio cujo volume foi de 0,223 litro.

Tabela 4.8: Comparação entre Equipamentos Convencionais e Centrífugos.

| Velocidade de Rotação (Rpm) | Fração Molar Alimentação (Mol%) | Fração Molar na Saída (Mol%) | Volume do Leito Convencional (Litros) |
|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| 500                         | 1,511                           | 1,412                        | 33,24                                 |
| 1500                        | 1,511                           | 1,404                        | 37,88                                 |
| 3000                        | 1,511                           | 1,390                        | 45,67                                 |
| 5000                        | 1,511                           | 1,382                        | 51,51                                 |

Pode ser verificado pela Tabela 4.8 que para a transferência obtida pelo leito centrífugo operando a 5000 rpm é necessário um leito convencional cujo volume equivale a aproximadamente 231 vezes o volume do equipamento centrífugo.

A mesma avaliação pode ser feita para os resultados obtidos operando o leito centrífugo com recheio 04, cilindros de wire mesh, com vazões de líquido de 1,5 l/min e de ar de 60 l/min. A Tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos e o volume do equipamento convencional necessário a realização desta separação.

Tabela 4.9: Comparação entre Equipamentos Convencionais e Centrífugos.

| Velocidade de Rotação (Rpm) | Fração Molar Alimentação (Mol%) | Fração Molar na Saída (Mol%) | Volume do Leito Convencional (Litros) |
|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| 500                         | 1,491                           | 1,391                        | 25,71                                 |
| 1500                        | 1,491                           | 1,383                        | 28,89                                 |
| 3000                        | 1,491                           | 1,376                        | 33,06                                 |
| 5000                        | 1,491                           | 1,369                        | 36,09                                 |

Em relação à Tabela 4.9, pode ser visto que operando o leito a 5000 rpm, a transferência de massa obtida no equipamento centrífugo equivale à obtida em um leito convencional de volume 160 vezes maior que o centrífugo, demonstrando o efeito da força centrífuga na “**intensificação do processo**” de transferência de massa.

# Capítulo 5:

# Conclusão e Sugestões

### 5.1 – Conclusões

Da análise dos resultados experimentais obtidos no desenvolvimento deste trabalho podem ser tomadas as seguintes conclusões:

1 – A velocidade de injeção da fase líquida no equipamento centrífugo, determinada pelo diâmetro do tubo injetor, influi significativamente no regime de escoamento das fases no leito centrífugo. Quanto maior a velocidade de injeção menor será a tendência ao arraste de líquido pela fase gasosa.

2 – O arraste de líquido é influenciado pelo tipo de enchimento, sendo que o aumento da porosidade do recheio diminui o arraste. A vazão da fase gasosa também afeta o arraste, como ocorre nos leitos convencionais, sendo que a partir de um valor limite de vazão de ar inicia-se o arraste.

3 – A queda de pressão no leito centrífugo é diretamente proporcional à velocidade de rotação. Partindo-se do leito estático e aumentando a velocidade de rotação verifica-se o aumento da queda de pressão, demonstrando que os leitos centrífugos apresentam queda de pressão maiores que os convencionais, operando sem a ocorrência de inundação.

4 – A queda de pressão no leito centrífugo é função diretamente proporcional à vazão da fase gasosa, comportamento análogo ao ocorrido nos leitos convencionais. Quanto a fase líquida, tomando-se como base a faixa testada neste trabalho, pode afirmar-se que este parâmetro não exerceu influência relevante na queda de pressão.

5 – A porosidade do enchimento afeta a queda de pressão no leito, sendo que leitos com maior porosidade apresentam menor queda de pressão e vice versa.

6 – A velocidade de rotação influencia fortemente o desempenho de transferência de massa do equipamento. Os coeficientes globais de transferência de massa, obtidos experimentalmente, foram função diretamente proporcional à velocidade de rotação, comprovando a influência da aceleração centrífuga na intensificação do processo de transferência de massa.

7 – As taxas de alimentação das fases líquida e gasosa no equipamento afetam o coeficiente  $K_{Ga}$ , sendo que para a dessorção, quanto maior a taxa da fase gasosa maior o coeficiente; no caso da fase líquida, o aumento da taxa é acompanhado pelo aumento do  $K_{Ga}$  até um valor limite, a partir do qual a fase gasosa (solvente) fica saturada e o coeficiente não é mais influenciado pela taxa da fase líquida.

8 – O desempenho do equipamento é função da área superficial do recheio, sendo que esta relação é diretamente proporcional. Neste trabalho o melhor desempenho de transferência de massa foi obtido para o recheio 04, do tipo wire mesh, que dentre os recheios testados era o que apresentava maior área superficial.

9 – O leito centrífugo, mesmo operando sem recheio, apresenta altas taxas de transferência de massa. Devido ao forte campo centrífugo, a fase líquida, ao entrar no rotor, forma um spray fino de líquido que propicia o contato entre as fases.

10 – Os coeficientes de transferência de massa para o leito centrífugo foram 3 a 4 vezes maiores que os valores calculados para os leitos convencionais operando sob as mesmas condições de vazão da fase líquida e gasosa, resultando na necessidade de um equipamento convencional de grande volume para realizar o mesmo grau de separação realizado em um equipamento centrífugo de dimensões reduzidas.



## 5.2 – Sugestões para Próximos Trabalhos

Tendo em vista a realização de futuros trabalhos visando uma avaliação mais completa dos efeitos das forças centrífugas no desempenho de transferência de massa, tendo como base a experiência obtida na realização do presente trabalho, são listadas algumas sugestões descritas na sequência.

- 1) A construção de um leito centrífugo de maiores dimensões, principalmente em relação ao diâmetro externo do equipamento, o qual forneça um campo centrífugo de maior intensidade em relação ao obtido para o equipamento testado neste trabalho.
- 2) A avaliação do equipamento centrífugo como reator para um sistema gás-líquido onde o tempo de contato entre as fases exerça influência na seletividade da reação desejada, por exemplo, a eliminação de  $\text{H}_2\text{S}$ , na presença de  $\text{CO}_2$ , em uma solução de  $\text{NaOH}$ .
- 3) A utilização de recheios de alta área superficial, maior que  $2000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .
- 4) A realização de experimentos com outros sistemas gás-líquido.
- 5) A utilização do equipamento como reator catalítico de 3 fases, onde o recheio atue como catalisador da reação.

# Bibliografia

## Referências Bibliográficas:

1. Billet, R.; Shultes, M. "Modeling of Pressure Drop in Packed Columns". Chem. Eng. Technol. 1991, 14, 89.
2. Coulson, J. M.; Richardson, J. F.; "Tecnologia Química – Operações Unitárias". Fundação Calouste Gulbenkian, 1968, Lisboa – Portugal.
3. Eckert, J. S., "Selecting the Proper Distillation Column Packing". Chemical Engineering Progress 1970, 66, 31,39-44.
4. Holmes, M. J.; Winkle, M. T. "Prediction of Ternary Vapor-Liquid Equilibria from Binary Data". Industrial and Engineering Chemistry 1970, 62, nº 1, 21 – 31.
5. Houston, R. W. e Walker, C. A. "Absorption in Packed Towers – Effect of Molecular Diffusivity on Gas Film Coefficient". Ind. Eng. Chem. 1950, 42, 1105.
6. Keyane, M.; Gardner, N. "Operating Characteristics of Rotating Beds". Chem Eng. Prog. 1989, 85, 48.
7. Kumar, P. M.; Rao, D. P. "Studies on a High-Gravity Gas-Liquid Contactor". Ind. Eng. Chem. Res. 1990, 29, 917.
8. Leonard, R. A. "Prediction of Hydraulic Performance in Annular Centrifugal Contactors". Argonne National Laboratory, ANL-80-57, July 1980.
9. Liu, H. S.; Lin, C. C. and Wu, S. "Characteristics of a Rotating Packed Bed". Ind. Eng. Chem. Res. 1996, 35, 3590-3596.
10. Lockett, M. J. "Flooding of Rotating Structured Packing and Its Application to Conventional Packed Columns". Trans Icheme. 73, Part A, May 1995.
11. Onda, K. e Colaboradores; "Mass Transfer Coefficients between Gas and Liquid Phases in Packed Columns". J. Chem. Eng. Jpn. 1968, 1, 56.

12. Perry, R. H.; Chilton, C. H.; "Chemical Engineers Handbook". 1973, McGraw-Hill, New York.
13. Ramshaw, C. "Higee Distillation – An Example of Process Intensification". Chem. Eng. 1983, 13, 13-14.
14. Singh, S. P.; Wilson, J. H. "Removal of Volatile Organic Compounds from Groundwater Using a Rotary Air Stripper". Ind. Eng. Chem. Res. 1992, 31, 574.
15. Shulman, H. L. e Colaboradores, "Performance of Packed Column II". A.I.Ch.E. Journal 1965, 1, 253.
16. Treybal, R. E. "Mass-Transfer Operations", Third Edition. McGraw-Hill Book Company, 1980, London.
17. Vivian, J. E.; Brian, P. L. T. e Krukonis, V. J. "The Influence of Gravitational Force on Gas Absorption in a Packed Column". A.I.Ch.E. Journal, 1965, 11, 1088-1091.
18. Wallis, G. B. "One-Dimensional Two-Phase Flow", 1969, McGraw-Hill, New York.

# Apêndice A:

## Planilhas

## Experimentos

## Hidrodinâmicos

Nesta seção estão listadas todas as planilhas de experimentos hidrodinâmicos realizados.

## A.1 - Experimentos - Determinação de Arraste de Líquido.

### Experimento de Hidrodinâmica 01

| G = 10 l/min |                            | Leito s/ recheio |               |             | Injetor 01 (diâmetro=4,5mm) |             |               |             |
|--------------|----------------------------|------------------|---------------|-------------|-----------------------------|-------------|---------------|-------------|
| Velocidade   | Queda de Pressão (cm água) |                  |               |             | Arraste (ml/min)            |             |               |             |
| (rpm)        | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min      | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min               | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0            | 0                          | 0                | 0             | 0           |                             |             |               |             |
| 300          | 0                          | 0                | 0             | 0           | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 600          | 0                          | 0                | 0             | 0           |                             |             |               |             |
| 900          | 0                          | 0                | 0             | 0,05        |                             |             |               |             |
| 1200         | 0                          | 0,1              | 0,1           | 0,1         | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 1500         | 0,05                       | 0,2              | 0,15          | 0,15        |                             |             |               |             |
| 1800         | 0,15                       | 0,2              | 0,2           | 0,2         |                             |             |               |             |
| 2100         | 0,2                        | 0,25             | 0,3           | 0,3         | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 2400         | 0,3                        | 0,3              | 0,4           | 0,4         |                             |             |               |             |
| 2700         | 0,4                        | 0,4              | 0,5           | 0,55        |                             |             |               |             |
| 3000         | 0,5                        | 0,5              | 0,6           | 0,7         | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 3300         | 0,6                        | 0,6              | 0,7           | 0,8         |                             |             |               |             |
| 3600         | 0,7                        | 0,7              | 0,7           | 0,9         |                             |             |               |             |
| 3900         | 0,9                        | 0,8              | 0,8           | 0,95        | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 4200         | 1,2                        | 0,9              | 1             | 1           |                             |             |               |             |
| 4500         | 1,4                        | 1,1              | 1             | 1,2         |                             |             |               |             |
| 4800         | 1,5                        | 1,3              | 1,3           | 1,3         | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 5100         | 1,6                        | 1,4              | 1,4           | 1,4         |                             |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido em toda a faixa testada.

### Experimento de Hidrodinâmica 02

| G = 20 l/min |                            | Leito s/ recheio |               |             | Injetor 01 (diâmetro=4,5mm) |             |               |             |
|--------------|----------------------------|------------------|---------------|-------------|-----------------------------|-------------|---------------|-------------|
| Veloc.       | Queda de Pressão (cm água) |                  |               |             | Arraste (ml/min)            |             |               |             |
| (rpm)        | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min      | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min               | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0            | 0                          | 0                | 0             | 0           |                             |             |               |             |
| 300          | 0                          | 0                | 0             | 0           | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 600          | 0                          | 0,1              | 0,1           | 0,1         |                             |             |               |             |
| 900          | 0,1                        | 0,2              | 0,1           | 0,1         |                             |             |               |             |
| 1200         | 0,2                        | 0,3              | 0,2           | 0,2         | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 1500         | 0,3                        | 0,4              | 0,3           | 0,3         |                             |             |               |             |
| 1800         | 0,4                        | 0,3              | 0,4           | 0,4         |                             |             |               |             |
| 2100         | 0,5                        | 0,4              | 0,5           | 0,5         | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 2400         | 0,6                        | 0,5              | 0,6           | 0,6         |                             |             |               |             |
| 2700         | 0,7                        | 0,6              | 0,7           | 0,8         |                             |             |               |             |
| 3000         | 0,8                        | 0,7              | 0,7           | 1           | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 3300         | 0,9                        | 0,8              | 0,9           | 1           |                             |             |               |             |
| 3600         | 1,1                        | 1                | 0,9           | 1,1         |                             |             |               |             |
| 3900         | 1,3                        | 1,2              | 1             | 1,2         | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 4200         | 1,5                        | 1,4              | 1,2           | 1,2         |                             |             |               |             |
| 4500         | 1,6                        | 1,5              | 1,3           | 1,3         |                             |             |               |             |
| 4800         | 1,5                        | 1,5              | 1,4           | 1,5         | 0                           | 0           | 0             | 0           |
| 5100         | 1,7                        | 1,6              | 1,5           | 1,7         |                             |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 03**

G = 30 l/min

Leito s/ recheio

Injetor 01 (diâmetro=4,5mm)

| Veloc. | Perda de Carga (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|--------|--------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
| (rpm)  | L = 0,5 l/min            | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0      | 0,2                      | 0,2         | 0,2           | 0,2         |                  |             |               |             |
| 300    | 0,3                      | 0,3         | 0,2           | 0,2         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 600    | 0,4                      | 0,4         | 0,3           | 0,3         |                  |             |               |             |
| 900    | 0,5                      | 0,4         | 0,4           | 0,4         |                  |             |               |             |
| 1200   | 0,6                      | 0,6         | 0,5           | 0,5         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 1500   | 0,7                      | 0,7         | 0,7           | 0,6         |                  |             |               |             |
| 1800   | 0,8                      | 0,8         | 0,8           | 0,8         |                  |             |               |             |
| 2100   | 0,9                      | 0,9         | 1             | 1           | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 2400   | 1                        | 1           | 1,1           | 1,1         |                  |             |               |             |
| 2700   | 1,2                      | 1,1         | 1,2           | 1,3         |                  |             |               |             |
| 3000   | 1,4                      | 1,2         | 1,3           | 1,5         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 3300   | 1,6                      | 1,4         | 1,4           | 1,5         |                  |             |               |             |
| 3600   | 1,6                      | 1,5         | 1,4           | 1,6         |                  |             |               |             |
| 3900   | 1,8                      | 1,5         | 1,5           | 1,6         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 4200   | 1,9                      | 1,7         | 1,7           | 1,7         |                  |             |               |             |
| 4500   | 2                        | 1,8         | 1,8           | 1,8         |                  |             |               |             |
| 4800   | 2,2                      | 2           | 2             | 1,9         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 5100   | 2,5                      | 2,2         | 2,2           | 2,1         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 04**

G = 45 l/min

Leito s/ recheio

Injetor 01 (diâmetro=4,5mm)

| Veloc. | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|--------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
| (rpm)  | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0      | 0,5                        | 0,5         | 0,7           | 0,9         |                  |             |               |             |
| 300    | 0,5                        | 0,7         | 0,9           | 0,9         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 600    | 0,6                        | 0,8         | 1,1           | 1           |                  |             |               |             |
| 900    | 0,8                        | 1           | 1,3           | 1,1         |                  |             |               |             |
| 1200   | 1                          | 1,2         | 1,5           | 1,3         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 1500   | 1,4                        | 1,4         | 1,7           | 1,4         |                  |             |               |             |
| 1800   | 2,2                        | 1,5         | 1,9           | 1,5         |                  |             |               |             |
| 2100   | 2,3                        | 1,6         | 2             | 1,6         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 2400   | 2,3                        | 1,6         | 2,1           | 2           |                  |             |               |             |
| 2700   | 2,5                        | 1,7         | 2,2           | 2,3         |                  |             |               |             |
| 3000   | 2,6                        | 1,8         | 2,4           | 2,5         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 3300   | 3,1                        | 2           | 2,5           | 2,5         |                  |             |               |             |
| 3600   | 3,4                        | 2,4         | 2,4           | 2,6         |                  |             |               |             |
| 3900   | 3,2                        | 2,5         | 2,8           | 2,5         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 4200   | 3,9                        | 2,6         | 2,8           | 2,6         |                  |             |               |             |
| 4500   | 3,7                        | 2,8         | 2,7           | 2,5         |                  |             |               |             |
| 4800   | 3,7                        | 2,9         | 2,9           | 2,6         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 5100   | 3,9                        | 3,2         | 3             | 2,7         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 05**

G = 60 l/min

Leito s/ recheio

Injetor 01 (diâmetro=4,5mm)

| Veloc. | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|--------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
| (rpm)  | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0      | 1,2                        | 1,3         | 1,3           | 1,9         |                  |             |               |             |
| 300    | 1,3                        | 2,3         | 3,5           | 3,7         | 0                | 16          | 49            | 71          |
| 600    | 1,7                        | 2,4         | 2,9           | 3           |                  |             |               |             |
| 900    | 2,5                        | 2,7         | 2,9           | 3,2         |                  |             |               |             |
| 1200   | 3,4                        | 3,3         | 3,3           | 3,4         | 31               | 27          | 22            | 17          |
| 1500   | 3,9                        | 3,5         | 3,5           | 3,5         |                  |             |               |             |
| 1800   | 4,1                        | 3,6         | 3,6           | 3,7         |                  |             |               |             |
| 2100   | 4,1                        | 3,7         | 4             | 3,8         | 27               | 16          | 7             | 5           |
| 2400   | 3,9                        | 3,9         | 4,2           | 4           |                  |             |               |             |
| 2700   | 4,5                        | 4,5         | 4,3           | 4,3         |                  |             |               |             |
| 3000   | 4,7                        | 4           | 4,1           | 4,4         | 39               | 16          | 44            | 4           |
| 3300   | 6                          | 4,1         | 4,3           | 4,5         |                  |             |               |             |
| 3600   | 6,3                        | 4,6         | 4,2           | 4,6         |                  |             |               |             |
| 3900   | 6,9                        | 5,4         | 4,6           | 4,9         | 101              | 49          | 26            | 12          |
| 4200   | 8,1                        | 5,3         | 4,6           | 4,9         |                  |             |               |             |
| 4500   | 8,4                        | 5,3         | 4,6           | 4,9         |                  |             |               |             |
| 4800   | 9,1                        | 5,3         | 4,7           | 4,9         | 114              | 22          | 14            | 7           |
| 5100   | 9,7                        | 5,3         | 4,9           | 4,9         |                  |             |               |             |

Obs.: Foi observado arraste de líquido em toda a faixa testada, e o arraste foi mais pronunciado para as vazões de líquido mais baixas.

**Experimento de Hidrodinâmica 06**

G = 80 l/min

Leito s/ recheio

Injetor 01 (diâmetro=4,5mm)

| Veloc. | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|--------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
| (rpm)  | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0      | 2,6                        | 2,6         | 2,6           | 3,3         |                  |             |               |             |
| 300    | 2,8                        | 7,7         | 11,3          | 11,7        | 0                | 107         | 170           | 180         |
| 600    | 3,5                        | 6,5         | 8,9           | 8,9         |                  |             |               |             |
| 900    | 5,1                        | 5,7         | 6,6           | 8,5         |                  |             |               |             |
| 1200   | 8,2                        | 8,4         | 8,2           | 8,3         | 109              | 101         | 76            | 87          |
| 1500   | 9,2                        | 8,6         | 7,3           | 7,9         |                  |             |               |             |
| 1800   | 10,2                       | 8,9         | 7,8           | 6,5         |                  |             |               |             |
| 2100   | 9,2                        | 7,6         | 7,2           | 7           | 133              | 80          | 59            | 56          |
| 2400   | 13,2                       | 8,4         | 8             | 7,7         |                  |             |               |             |
| 2700   | 14,2                       | 10,3        | 9,8           | 8,1         |                  |             |               |             |
| 3000   | 14,7                       | 9,2         | 9,1           | 7,9         | 181              | 93          | 86            | 44          |
| 3300   | 15,2                       | 9           | 9,8           | 7,8         |                  |             |               |             |
| 3600   | 16,2                       | 13,7        | 8,6           | 7,4         |                  |             |               |             |
| 3900   | 16,7                       | 12,2        | 9,5           | 8,3         | 200              | 131         | 77            | 62          |
| 4200   | 17,2                       | 13          | 8,5           | 8,2         |                  |             |               |             |
| 4500   | 18,7                       | 12,4        | 7,5           | 8,4         |                  |             |               |             |
| 4800   | 20,2                       | 11,2        | 9,4           | 8,3         | 258              | 95          | 83            | 46          |
| 5100   | 23,2                       | 11,2        | 9,7           | 8,5         |                  |             |               |             |

Obs.: Foi observado arraste de líquido em toda a faixa testada, e o arraste foi mais pronunciado para as vazões de líquido mais baixas, inclusive, para a vazão líquida de 0,5 l/min operando com 4800 rpm, aproximadamente 50% do líquido que entrava na coluna era arrastado pela fase gasosa.



**Experimento de Hidrodinâmica 07**

G = 10 l/min

Leito s/ recheio

Injetor 02 (diâmetro=6,2mm)

| Veloc.<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|-----------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-----------|-------------|-----------|
|                 | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0               | 0                          | 0           | 0             | 0           |                  |           |             |           |
| 300             | 0                          | 0           | 0             | 0           | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 600             | 0                          | 0           | 0             | 0           |                  |           |             |           |
| 900             | 0                          | 0           | 0             | 0           |                  |           |             |           |
| 1200            | 0,1                        | 0,05        | 0             | 0           | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 1500            | 0,1                        | 0,1         | 0,05          | 0,05        |                  |           |             |           |
| 1800            | 0,2                        | 0,15        | 0,1           | 0,1         |                  |           |             |           |
| 2100            | 0,3                        | 0,2         | 0,15          | 0,15        | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 2400            | 0,3                        | 0,3         | 0,2           | 0,25        |                  |           |             |           |
| 2700            | 0,4                        | 0,4         | 0,3           | 0,35        |                  |           |             |           |
| 3000            | 0,5                        | 0,5         | 0,4           | 0,45        | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 3300            | 0,7                        | 0,6         | 0,5           | 0,5         |                  |           |             |           |
| 3600            | 0,8                        | 0,7         | 0,6           | 0,7         |                  |           |             |           |
| 3900            | 0,9                        | 0,9         | 0,8           | 0,9         | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 4200            | 1                          | 1           | 0,9           | 1           |                  |           |             |           |
| 4500            | 1,2                        | 1,3         | 1             | 1,1         |                  |           |             |           |
| 4800            | 1,3                        | 1,4         | 1,2           | 1,3         | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 5100            | 1,4                        | 1,5         | 1,3           | 1,4         |                  |           |             |           |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 08**

G = 20 l/min

Leito s/ recheio

Injetor 02 (diâmetro=6,2mm)

| Veloc.<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |           |             |           | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|-----------------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-----------|-------------|-----------|
|                 | L=0,5 l/min                | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0               | 0                          | 0         | 0           | 0         |                  |           |             |           |
| 300             | 0                          | 0         | 0           | 0         | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 600             | 0                          | 0,05      | 0,05        | 0,1       |                  |           |             |           |
| 900             | 0,05                       | 0,1       | 0,1         | 0,15      |                  |           |             |           |
| 1200            | 0,1                        | 0,15      | 0,15        | 0,2       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 1500            | 0,2                        | 0,3       | 0,25        | 0,25      |                  |           |             |           |
| 1800            | 0,3                        | 0,4       | 0,35        | 0,3       |                  |           |             |           |
| 2100            | 0,4                        | 0,5       | 0,5         | 0,4       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 2400            | 0,5                        | 0,6       | 0,55        | 0,5       |                  |           |             |           |
| 2700            | 0,7                        | 0,7       | 0,7         | 0,7       |                  |           |             |           |
| 3000            | 0,9                        | 0,8       | 0,8         | 0,8       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 3300            | 1                          | 0,9       | 0,9         | 0,9       |                  |           |             |           |
| 3600            | 1,1                        | 1,1       | 1           | 1         |                  |           |             |           |
| 3900            | 1,2                        | 1,1       | 1,1         | 1,1       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 4200            | 1,3                        | 1,3       | 1,3         | 1,2       |                  |           |             |           |
| 4500            | 1,5                        | 1,4       | 1,4         | 1,3       |                  |           |             |           |
| 4800            | 1,7                        | 1,5       | 1,5         | 1,4       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 5100            | 1,8                        | 1,7       | 1,6         | 1,5       |                  |           |             |           |

Obs.: Não foi observado arraste em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 09**

G = 30 l/min

Leito s/ recheio

Injetor 02 (diâmetro=6,2mm)

| Veloc. | Queda de Pressão (cm água) |           |             |           | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|--------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-----------|-------------|-----------|
| (rpm)  | L=0,5 l/min                | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0      | 0,2                        | 0,2       | 0,2         | 0,2       |                  |           |             |           |
| 300    | 0,3                        | 0,3       | 0,2         | 0,2       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 600    | 0,4                        | 0,4       | 0,3         | 0,3       |                  |           |             |           |
| 900    | 0,5                        | 0,5       | 0,4         | 0,4       |                  |           |             |           |
| 1200   | 0,6                        | 0,6       | 0,5         | 0,5       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 1500   | 0,7                        | 0,7       | 0,6         | 0,6       |                  |           |             |           |
| 1800   | 0,8                        | 0,8       | 0,7         | 0,7       |                  |           |             |           |
| 2100   | 1                          | 1         | 0,8         | 0,9       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 2400   | 1,2                        | 1         | 1,2         | 1,1       |                  |           |             |           |
| 2700   | 1,4                        | 1,1       | 1,3         | 1,1       |                  |           |             |           |
| 3000   | 1,6                        | 1,2       | 1,4         | 1,3       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 3300   | 1,8                        | 1,4       | 1,4         | 1,5       |                  |           |             |           |
| 3600   | 1,9                        | 1,5       | 1,5         | 1,5       |                  |           |             |           |
| 3900   | 2                          | 1,6       | 1,6         | 1,6       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 4200   | 2,1                        | 2         | 1,8         | 1,7       |                  |           |             |           |
| 4500   | 2,3                        | 2,2       | 2           | 2,1       |                  |           |             |           |
| 4800   | 2,4                        | 2,3       | 2,2         | 2,1       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 5100   | 2,6                        | 2,4       | 2,3         | 2,2       |                  |           |             |           |

Obs.: Não foi observado arraste em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 10**

G = 45 l/min

Leito s/ recheio

Injetor 02 (diâmetro=6,2mm)

| Veloc. | Queda de Pressão (cm água) |           |             |           | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|--------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-----------|-------------|-----------|
| (rpm)  | L=0,5 l/min                | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0      | 0,4                        | 0,4       | 0,4         | 0,4       |                  |           |             |           |
| 300    | 0,5                        | 0,5       | 0,5         | 0,5       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 600    | 0,6                        | 0,6       | 0,6         | 0,6       |                  |           |             |           |
| 900    | 0,7                        | 0,7       | 0,8         | 0,7       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 1200   | 2,7                        | 0,9       | 2,2         | 0,8       | 13               | 0         | 8           | 0         |
| 1500   | 3,6                        | 3,7       | 2,3         | 2,2       | 59               | 83        | 5           | 5         |
| 1800   | 5                          | #         | #           | 2,6       |                  |           |             |           |
| 2100   | 5,5                        | #         | #           | 2,8       | 177              | 342       | 316         | 11        |
| 2400   | 5,6                        | #         | #           | 4         |                  |           |             |           |
| 2700   | 5,7                        | #         | #           | 3,5       | 178              | 349       | 460         | 83        |
| 3000   | 5,9                        | #         | #           | #         |                  |           |             |           |
| 3300   | 5,7                        | #         | #           | #         | 186              | 371       | 532         | 357       |
| 3600   | 5,8                        | #         | #           | #         |                  |           |             |           |
| 3900   | 5,9                        | #         | #           | #         | 233              | 474       | 502         | 452       |
| 4200   | #                          | #         | #           | #         |                  |           |             |           |
| 4500   | #                          | #         | #           | #         | 183              | 492       | 448         | 462       |
| 4800   | #                          | #         | #           | #         |                  |           |             |           |
| 5100   | #                          | #         | #           | #         | 197              | 502       | 486         | 446       |

# - sistema altamente turbulento, impossibilitando medidas de queda de pressão.

Obs.: Foi observado arraste pronunciado da fase líquida pela fase gasosa em toda a faixa de vazões da fase líquida e para toda a faixa de velocidade de rotação.

**Experimento de Hidrodinâmica 11**

G = 60/min

Leito s/ recheio

Injetor 02 (diâmetro=6,2mm)

| Veloc.<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |           |             |           | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|-----------------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-----------|-------------|-----------|
|                 | L=0,5 l/min                | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0               | 0,4                        | 0,9       | 1           | 0,9       |                  |           |             | 0         |
| 300             | 0,6                        | 1         | 1,1         | 2,3       | 0                | 0         | 0           | 16        |
| 600             | 0,7                        | 2,4       | 2,8         | 2,9       | 0                | 13        | 22          | 19        |
| 900             | #                          | #         | 4,3         | 3,7       | 112              | 136       | 102         | 28        |
| 1200            | #                          | #         | #           | #         | 227              | 236       | 161         | 79        |
| 1500            | #                          | #         | #           | #         | 311              | 438       | 336         | 118       |
| 1800            | #                          | #         | #           | #         | 360              | 510       | 450         | 187       |
| 2100            | #                          | #         | #           | #         | 378              | 540       | 465         | 195       |
| 2400            | #                          | #         | #           | #         | 398              | 590       | 530         | 280       |
| 2700            | #                          | #         | #           | #         | 420              | 600       | 590         | 315       |
| 3000            | #                          | #         | #           | #         | 464              | 600       | 710         | 400       |
| 3300            | #                          | #         | #           | #         | 500              | 600       | 755         | 610       |
| 3600            | #                          | #         | #           | #         | 500              | 585       | 750         | 680       |
| 3900            | #                          | #         | #           | #         | 500              | 620       | 640         | 660       |
| 4200            | #                          | #         | #           | #         | 500              | 640       | 640         |           |
| 4500            | #                          | #         | #           | #         | 500              | 660       | 660         | 710       |
| 4800            | #                          | #         | #           | #         | 500              | 650       | 650         |           |
| 5100            | #                          | #         | #           | #         | 500              | 655       | 690         | 680       |

# - sistema altamente turbulento, impossibilitando medidas de queda de pressão.

Obs.: Sistema altamente turbulento, arraste pronunciado de líquido pela fase gasosa, inclusive, para a vazão de 0,5 l/min para a fase líquida, a aproximadamente 3000 rpm, toda a fase líquida injetada foi arrastada pela fase gasosa.

**Experimento de Hidrodinâmica 12**

G = 80/min

Leito s/ recheio

Injetor 02 (diâmetro=6,2mm)

| Veloc.<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |           |             |           | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|-----------------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-----------|-------------|-----------|
|                 | L=0,5 l/min                | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0               | #                          | #         | #           | ##        | 0                | 0         | 0           | ##        |
| 300             | #                          | #         | #           | ##        | 40               | 0         | 74          | ##        |
| 600             | #                          | #         | #           | ##        |                  |           |             | ##        |
| 900             | #                          | #         | #           | ##        | 340              | 380       | 320         | ##        |
| 1200            | #                          | #         | #           | ##        |                  |           |             | ##        |
| 1500            | #                          | #         | #           | ##        | 470              | 540       | 600         | ##        |
| 1800            | #                          | #         | #           | ##        |                  |           |             | ##        |
| 2100            | #                          | #         | #           | ##        | 480              | 680       | 760         | ##        |
| 2400            | #                          | #         | #           | ##        |                  |           |             | ##        |
| 2700            | #                          | #         | #           | ##        | 500              | 700       | 780         | ##        |
| 3000            | #                          | #         | #           | ##        |                  |           |             | ##        |
| 3300            | #                          | #         | #           | ##        | 500              | 730       | 880         | ##        |
| 3600            | #                          | #         | #           | ##        |                  |           |             | ##        |
| 3900            | #                          | #         | #           | ##        | 500              | 780       | 780         | ##        |
| 4200            | #                          | #         | #           | ##        |                  |           |             | ##        |
| 4500            | #                          | #         | #           | ##        | 500              |           | 840         | ##        |
| 4800            | #                          | #         | #           | ##        |                  |           |             | ##        |
| 5100            | #                          | #         | #           | ##        | 500              | 760       | 880         | ##        |

## - sistema sem condições de análise de arraste ou queda de pressão.

Obs.: Para este experimento o arraste foi incontrolável, inclusive para a vazão de líquido de 2,0 l/min não foi possível medir a queda de pressão e o arraste.

**Experimento de Hidrodinâmica 13**

G = 80/min

Leito s/ recheio

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| veloc. | Queda de Pressão (cm água) |           |             |           | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|--------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-----------|-------------|-----------|
| (rpm)  | L=0,5 l/min                | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0      | 1,9                        | 2,4       | 2,5         | 2,3       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 300    | 2,7                        | 3,6       | 3,8         | 3,8       |                  |           |             |           |
| 600    | 3,4                        | 3,7       | 4,1         | 4,3       | 11               | 16        | 19          | 19        |
| 900    | 3,9                        | 3,8       | 4,2         | 4,7       |                  |           |             |           |
| 1200   | 4,6                        | 4         | 4,3         | 4,7       | 19               | 26        | 28          | 24        |
| 1500   | 5                          | 5,2       | 5,1         | 4,8       |                  |           |             |           |
| 1800   | 5,5                        | 5,8       | 5,5         | 5         | 24               | 38        | 32          | 23        |
| 2100   | 5,7                        | 6,7       | 5,8         | 4,9       |                  |           |             |           |
| 2400   | 5,8                        | 6,5       | 6,3         | 5,7       | 16               | 36        | 28          | 21        |
| 2700   | 4,9                        | 6,8       | 6,5         | 5,9       |                  |           |             |           |
| 3000   | 5,9                        | 7,1       | 6,9         | 6,4       | 13               | 34        | 25          | 16        |
| 3300   | 6,6                        | 7,6       | 7,7         | 6,5       |                  |           |             |           |
| 3600   | 7,6                        | 7,9       | 7,6         | 6,7       | 29               | 36        | 31          | 13        |
| 3900   | 6,9                        | 8,3       | 7,5         | 6,6       |                  |           |             |           |
| 4200   | 6,5                        | 7,8       | 8,2         | 6         | 14               | 13        | 17          | 0         |
| 4500   | 7,4                        | 7,6       | 7,7         | 6,5       |                  |           |             |           |
| 4800   | 7,8                        | 6,9       | 7,8         | 6,7       | 17               | 8         | 8           |           |
| 5100   | 9,1                        | 6,7       | 7,1         | 6,8       |                  |           |             |           |

Obs.: Neste experimento foi observado uma pequena quantidade de arraste da fase líquida para a toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 14**

G = 60/min

Leito s/ recheio

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Veloc. | Queda de Pressão (cm água) |           |             |           | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|--------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-----------|-------------|-----------|
| (rpm)  | L=0,5 l/min                | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0      | 0,8                        | 1,1       | 1,9         | 1,5       |                  |           |             |           |
| 300    | 1,7                        | 1,9       | 2           | 2,2       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 600    | 1,8                        | 2         | 2,2         | 2,2       |                  |           |             |           |
| 900    | 2,3                        | 2,2       | 2,3         | 2,8       |                  |           |             |           |
| 1200   | 2,5                        | 2,4       | 2,7         | 3         | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 1500   | 2,9                        | 2,8       | 3,1         | 3,2       |                  |           |             |           |
| 1800   | 3,3                        | 3,6       | 3,1         | 3,4       |                  |           |             |           |
| 2100   | 2,9                        | 3,7       | 3,2         | 3,1       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 2400   | 3                          | 3,9       | 3,4         | 3,2       |                  |           |             |           |
| 2700   | 3                          | 4         | 3,4         | 3,5       |                  |           |             |           |
| 3000   | 3,5                        | 4,1       | 3,6         | 3,6       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 3300   | 3,9                        | 4,3       | 4,2         | 4,1       |                  |           |             |           |
| 3600   | 4,3                        | 4,6       | 4,6         | 4,2       |                  |           |             |           |
| 3900   | 4,2                        | 4,4       | 4,7         | 4,3       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 4200   | 4,4                        | 4,4       | 4,6         | 4,5       |                  |           |             |           |
| 4500   | 4,6                        | 4,4       | 4,8         | 4,7       |                  |           |             |           |
| 4800   | 5,1                        | 4,5       | 4,9         | 4,9       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 5100   | 5,1                        | 4,6       | 4,9         | 5         |                  |           |             |           |

Obs.: Não foi observado arraste em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 15**

G = 45/min

Leito s/ recheio

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Veloc. | Queda de Pressão (cm água) |           |             |           | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|--------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-----------|-------------|-----------|
| (rpm)  | L=0,5 l/min                | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0      | 0,7                        | 0,7       | 0,7         | 0,8       |                  |           |             |           |
| 300    | 0,8                        | 0,8       | 1           | 1,5       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 600    | 1                          | 1         | 1,1         | 1,6       |                  |           |             |           |
| 900    | 1,2                        | 1,1       | 1,3         | 1,6       |                  |           |             |           |
| 1200   | 1,3                        | 1,3       | 1,4         | 1,8       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 1500   | 1,8                        | 1,7       | 1,5         | 2         |                  |           |             |           |
| 1800   | 2                          | 2         | 1,8         | 2,2       |                  |           |             |           |
| 2100   | 1,8                        | 2,1       | 2           | 2,5       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 2400   | 2                          | 2,3       | 2,3         | 2,5       |                  |           |             |           |
| 2700   | 2,2                        | 2,7       | 2,8         | 2,6       |                  |           |             |           |
| 3000   | 2,3                        | 2,9       | 3           | 2,9       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 3300   | 2,5                        | 3         | 3,1         | 3,1       |                  |           |             |           |
| 3600   | 2,7                        | 3,5       | 3,5         | 3,3       |                  |           |             |           |
| 3900   | 2,9                        | 3,2       | 3,8         | 3,5       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 4200   | 3,2                        | 3,3       | 4,1         | 3,7       |                  |           |             |           |
| 4500   | 3,6                        | 3,5       | 4,1         | 4         |                  |           |             |           |
| 4800   | 3,8                        | 3,6       | 4,2         | 4,1       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 5100   | 3,8                        | 3,7       | 4           | 4,2       |                  |           |             |           |

Obs.: Não foi observado arraste em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 16**

G = 30/min

Leito s/ recheio

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Veloc. | Queda de Pressão (cm água) |           |             |           | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|--------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-----------|-------------|-----------|
| (rpm)  | L=0,5 l/min                | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0      | 0,3                        | 0,3       | 0,4         | 0,4       |                  |           |             |           |
| 300    | 0,4                        | 0,4       | 0,5         | 0,5       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 600    | 0,5                        | 0,5       | 0,6         | 0,6       |                  |           |             |           |
| 900    | 0,6                        | 0,6       | 0,7         | 0,7       |                  |           |             |           |
| 1200   | 0,8                        | 0,7       | 0,8         | 0,9       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 1500   | 1                          | 0,9       | 1           | 1         |                  |           |             |           |
| 1800   | 1,2                        | 1,1       | 1,1         | 1,1       |                  |           |             |           |
| 2100   | 1,4                        | 1,4       | 1,3         | 1,3       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 2400   | 1,5                        | 1,6       | 1,5         | 1,5       |                  |           |             |           |
| 2700   | 1,6                        | 1,8       | 1,8         | 1,7       |                  |           |             |           |
| 3000   | 1,7                        | 2         | 2           | 1,9       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 3300   | 1,7                        | 2,1       | 2,2         | 2,1       |                  |           |             |           |
| 3600   | 1,8                        | 2,2       | 2,4         | 2,2       |                  |           |             |           |
| 3900   | 2                          | 2,4       | 2,6         | 2,4       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 4200   | 2,1                        | 2,4       | 2,6         | 2,7       |                  |           |             |           |
| 4500   | 2,3                        | 2,6       | 2,8         | 2,9       |                  |           |             |           |
| 4800   | 2,4                        | 2,7       | 2,9         | 3         | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 5100   | 2,6                        | 2,8       | 3           | 3,1       |                  |           |             |           |

Obs.: Não foi observado arraste em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 17**

G = 20/min

Leito s/ recheio

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Veloc. | Queda de Pressão (cm água) |           |             |           | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|--------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-----------|-------------|-----------|
| (rpm)  | L=0,5 l/min                | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0      | 0,1                        | 0,1       | 0,1         | 0,1       |                  |           |             |           |
| 300    | 0,2                        | 0,2       | 0,2         | 0,2       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 600    | 0,3                        | 0,3       | 0,3         | 0,3       |                  |           |             |           |
| 900    | 0,4                        | 0,4       | 0,3         | 0,3       |                  |           |             |           |
| 1200   | 0,6                        | 0,5       | 0,5         | 0,4       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 1500   | 0,7                        | 0,6       | 0,6         | 0,6       |                  |           |             |           |
| 1800   | 0,8                        | 0,7       | 0,7         | 0,7       |                  |           |             |           |
| 2100   | 0,8                        | 0,9       | 0,8         | 0,8       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 2400   | 0,9                        | 1,1       | 1           | 0,9       |                  |           |             |           |
| 2700   | 1                          | 1,2       | 1,2         | 1,1       |                  |           |             |           |
| 3000   | 1,1                        | 1,3       | 1,3         | 1,3       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 3300   | 1,2                        | 1,4       | 1,5         | 1,5       |                  |           |             |           |
| 3600   | 1,3                        | 1,6       | 1,6         | 1,5       |                  |           |             |           |
| 3900   | 1,5                        | 1,7       | 1,7         | 1,8       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 4200   | 1,7                        | 1,8       | 2           | 2         |                  |           |             |           |
| 4500   | 1,8                        | 1,9       | 2,2         | 2,2       |                  |           |             |           |
| 4800   | 2                          | 2,1       | 2,4         | 2,5       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 5100   | 2,2                        | 2,3       | 2,5         | 2,6       |                  |           |             |           |

Obs.: Não foi observado arraste em toda faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 18**

G = 10/min

Leito s/ recheio

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Veloc. | Queda de Pressão (cm água) |           |             |           | Arraste (ml/min) |           |             |           |
|--------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|------------------|-----------|-------------|-----------|
| (rpm)  | L=0,5 l/min                | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min | L=0,5 l/min      | L=1 l/min | L=1,5 l/min | L=2 l/min |
| 0      | 0,1                        | 0,1       | 0,1         | 0,1       |                  |           |             |           |
| 300    | 0,1                        | 0,2       | 0,15        | 0,15      | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 600    | 0,1                        | 0,2       | 0,2         | 0,2       |                  |           |             |           |
| 900    | 0,2                        | 0,3       | 0,3         | 0,3       |                  |           |             |           |
| 1200   | 0,3                        | 0,3       | 0,3         | 0,35      | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 1500   | 0,3                        | 0,4       | 0,35        | 0,4       |                  |           |             |           |
| 1800   | 0,4                        | 0,4       | 0,4         | 0,5       |                  |           |             |           |
| 2100   | 0,5                        | 0,5       | 0,5         | 0,7       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 2400   | 0,6                        | 0,7       | 0,7         | 0,8       |                  |           |             |           |
| 2700   | 0,7                        | 0,9       | 0,9         | 0,8       |                  |           |             |           |
| 3000   | 0,8                        | 1,1       | 1,1         | 0,9       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 3300   | 0,9                        | 1,1       | 1,3         | 1,1       |                  |           |             |           |
| 3600   | 1                          | 1,3       | 1,4         | 1,2       |                  |           |             |           |
| 3900   | 1,1                        | 1,4       | 1,5         | 1,3       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 4200   | 1,3                        | 1,4       | 1,6         | 1,5       |                  |           |             |           |
| 4500   | 1,5                        | 1,5       | 1,7         | 1,6       |                  |           |             |           |
| 4800   | 1,6                        | 1,7       | 1,9         | 1,7       | 0                | 0         | 0           | 0         |
| 5100   | 1,7                        | 1,8       | 2           | 2         |                  |           |             |           |

Obs.: Não foi observado arraste em toda faixa testada.

## A.2– Análises Hidrodinâmicas do Leito de Recheio Centrífugo.

### Experimento de Hidrodinâmica 19

| L = 0 l/min(dry bed) |                            | recheio02  |            | Injetor 03 (diâmetro=3,0mm) |            |            |
|----------------------|----------------------------|------------|------------|-----------------------------|------------|------------|
| Velocidade           | Queda de Pressão (cm água) |            |            |                             |            |            |
| (rpm)                | G=10 l/min                 | G=20 l/min | G=30 l/min | G=45 l/min                  | G=60 l/min | G=80 l/min |
| 0                    | 0                          | 0          | 0          | 0,1                         | 0,3        | 0,7        |
| 300                  | 0                          | 0          | 0          | 0,1                         | 0,3        | 0,7        |
| 600                  | 0                          | 0          | 0          | 0,2                         | 0,4        | 0,8        |
| 900                  | 0                          | 0,1        | 0,2        | 0,4                         | 0,6        | 0,9        |
| 1200                 | 0,05                       | 0,1        | 0,3        | 0,5                         | 0,7        | 1,1        |
| 1500                 | 0,15                       | 0,25       | 0,4        | 0,6                         | 0,9        | 1,3        |
| 1800                 | 0,2                        | 0,4        | 0,6        | 0,8                         | 1,1        | 1,5        |
| 2100                 | 0,3                        | 0,6        | 0,7        | 1                           | 1,3        | 1,7        |
| 2400                 | 0,5                        | 0,7        | 0,9        | 1,2                         | 1,5        | 2          |
| 2700                 | 0,8                        | 1          | 1,2        | 1,4                         | 1,7        | 2,3        |
| 3000                 | 1                          | 1,2        | 1,4        | 1,7                         | 2,1        | 2,6        |
| 3300                 | 1,2                        | 1,3        | 1,6        | 2                           | 2,3        | 2,8        |
| 3600                 | 1,6                        | 1,7        | 1,9        | 2,3                         | 2,7        | 3,2        |
| 3900                 | 1,8                        | 2          | 2,3        | 2,8                         | 3          | 3,5        |
| 4200                 | 2,1                        | 2,3        | 2,5        | 3,1                         | 3,4        | 3,9        |
| 4500                 | 2,5                        | 2,6        | 2,8        | 3,4                         | 3,7        | 4,4        |
| 4800                 | 2,8                        | 2,9        | 3          | 3,6                         | 4,1        | 4,8        |
| 5100                 | 3,1                        | 3,2        | 3,4        | 4                           | 4,6        | 5,2        |

### Experimento de Hidrodinâmica 20

| G = 10 l/min |                            | recheio02   |               | Injetor 03 (diâmetro=3,0mm) |                  |             |               |             |
|--------------|----------------------------|-------------|---------------|-----------------------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
| Velocidade   | Queda de Pressão (cm água) |             |               |                             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
| (rpm)        | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min                 | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0            | 0                          | 0           | 0             | 0                           |                  |             |               |             |
| 300          | 0                          | 0           | 0             | 0,05                        |                  |             |               |             |
| 600          | 0                          | 0,05        | 0,05          | 0,1                         |                  |             |               |             |
| 900          | 0,05                       | 0,1         | 0,1           | 0,2                         |                  |             |               |             |
| 1200         | 0,1                        | 0,15        | 0,2           | 0,3                         |                  |             |               |             |
| 1500         | 0,2                        | 0,3         | 0,3           | 0,4                         |                  |             |               |             |
| 1800         | 0,4                        | 0,5         | 0,5           | 0,6                         |                  |             |               |             |
| 2100         | 0,5                        | 0,6         | 0,6           | 0,7                         |                  |             |               |             |
| 2400         | 0,7                        | 0,8         | 0,8           | 1                           |                  |             |               |             |
| 2700         | 0,9                        | 1           | 1             | 1,2                         |                  |             |               |             |
| 3000         | 1,1                        | 1,2         | 1,2           | 1,4                         |                  |             |               |             |
| 3300         | 1,4                        | 1,4         | 1,4           | 1,6                         |                  |             |               |             |
| 3600         | 1,6                        | 1,7         | 1,7           | 1,9                         |                  |             |               |             |
| 3900         | 1,9                        | 2           | 2,1           | 2,2                         |                  |             |               |             |
| 4200         | 2,2                        | 2,3         | 2,5           | 2,5                         |                  |             |               |             |
| 4500         | 2,5                        | 2,6         | 2,7           | 2,8                         |                  |             |               |             |
| 4800         | 2,8                        | 2,9         | 3,1           | 3,2                         |                  |             |               |             |
| 5100         | 3,3                        | 3,3         | 3,4           | 3,5                         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 21**

G = 20 l/min      recheio02      Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0                          | 0           | 0             | 0           |                  |             |               |             |
| 300                 | 0                          | 0           | 0             | 0,1         |                  |             |               |             |
| 600                 | 0,1                        | 0,1         | 0,1           | 0,1         |                  |             |               |             |
| 900                 | 0,1                        | 0,1         | 0,2           | 0,2         |                  |             |               |             |
| 1200                | 0,2                        | 0,2         | 0,3           | 0,4         |                  |             |               |             |
| 1500                | 0,3                        | 0,3         | 0,4           | 0,5         |                  |             |               |             |
| 1800                | 0,5                        | 0,5         | 0,6           | 0,7         |                  |             |               |             |
| 2100                | 0,6                        | 0,7         | 0,7           | 0,8         |                  |             |               |             |
| 2400                | 0,8                        | 0,9         | 1             | 1,1         |                  |             |               |             |
| 2700                | 0,9                        | 1,1         | 1,2           | 1,3         |                  |             |               |             |
| 3000                | 1,1                        | 1,3         | 1,5           | 1,5         |                  |             |               |             |
| 3300                | 1,4                        | 1,7         | 1,8           | 1,8         |                  |             |               |             |
| 3600                | 1,7                        | 2           | 2             | 2,1         |                  |             |               |             |
| 3900                | 2                          | 2,2         | 2,2           | 2,3         |                  |             |               |             |
| 4200                | 2,3                        | 2,5         | 2,5           | 2,6         |                  |             |               |             |
| 4500                | 2,7                        | 2,8         | 2,8           | 2,9         |                  |             |               |             |
| 4800                | 3                          | 3,1         | 3,2           | 3,3         |                  |             |               |             |
| 5100                | 3,4                        | 3,5         | 3,6           | 3,7         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido em toda faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 22**

G = 30 l/min      recheio02      Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0                          | 0           | 0             | 0           |                  |             |               |             |
| 300                 | 0                          | 3,7         | 3,7           | 3,7         |                  |             |               |             |
| 600                 | 0,1                        | 0,1         | 0,2           | 0,2         |                  |             |               |             |
| 900                 | 0,2                        | 0,2         | 0,3           | 0,3         |                  |             |               |             |
| 1200                | 0,3                        | 0,4         | 0,4           | 0,4         |                  |             |               |             |
| 1500                | 0,5                        | 0,5         | 0,5           | 0,6         |                  |             |               |             |
| 1800                | 0,6                        | 0,7         | 0,6           | 0,8         |                  |             |               |             |
| 2100                | 0,8                        | 0,9         | 0,9           | 1           |                  |             |               |             |
| 2400                | 1                          | 1,1         | 1,1           | 1,2         |                  |             |               |             |
| 2700                | 1,2                        | 1,3         | 1,4           | 1,5         |                  |             |               |             |
| 3000                | 1,3                        | 1,4         | 1,6           | 1,7         |                  |             |               |             |
| 3300                | 1,6                        | 1,8         | 1,9           | 2           |                  |             |               |             |
| 3600                | 1,9                        | 2,1         | 2,1           | 2,2         |                  |             |               |             |
| 3900                | 2,2                        | 2,3         | 2,4           | 2,6         |                  |             |               |             |
| 4200                | 2,4                        | 2,5         | 2,6           | 2,9         |                  |             |               |             |
| 4500                | 2,8                        | 2,9         | 3             | 3,2         |                  |             |               |             |
| 4800                | 3,2                        | 3,3         | 3,4           | 3,5         |                  |             |               |             |
| 5100                | 3,7                        | 3,8         | 3,9           | 4,1         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido em toda faixa testada.



**Experimento de Hidrodinâmica 23**

G = 45 l/min      recheio02      Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0                          | 0           | 0             | 0           |                  |             |               |             |
| 300                 | 0                          | 0,1         | 0,2           | 0,1         |                  |             |               |             |
| 600                 | 0,1                        | 0,2         | 0,3           | 0,3         |                  |             |               |             |
| 900                 | 0,2                        | 0,3         | 0,4           | 0,5         |                  |             |               |             |
| 1200                | 0,3                        | 0,4         | 0,5           | 0,6         |                  |             |               |             |
| 1500                | 0,5                        | 0,6         | 0,7           | 0,7         |                  |             |               |             |
| 1800                | 0,7                        | 0,8         | 0,9           | 1           |                  |             |               |             |
| 2100                | 0,9                        | 1           | 1             | 1,2         |                  |             |               |             |
| 2400                | 1,2                        | 1,3         | 1,3           | 1,4         |                  |             |               |             |
| 2700                | 1,4                        | 1,5         | 1,6           | 1,7         |                  |             |               |             |
| 3000                | 1,6                        | 1,8         | 1,9           | 2           |                  |             |               |             |
| 3300                | 2                          | 2,2         | 2,2           | 2,3         |                  |             |               |             |
| 3600                | 2,3                        | 2,4         | 2,4           | 2,5         |                  |             |               |             |
| 3900                | 2,6                        | 2,7         | 2,8           | 2,9         |                  |             |               |             |
| 4200                | 2,9                        | 2,9         | 3             | 3,1         |                  |             |               |             |
| 4500                | 3,1                        | 3,2         | 3,3           | 3,4         |                  |             |               |             |
| 4800                | 3,6                        | 3,6         | 3,6           | 3,7         |                  |             |               |             |
| 5100                | 4                          | 4           | 4             | 4,1         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 24**

G = 60 l/min      recheio02      Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0,9                        | 0,9         | 2,2           | 2,3         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 300                 | 1,9                        | 2,7         | 2,6           | 2,7         | ...              | 3           | 5             | 5           |
| 600                 | 2,1                        | 2,9         | 2,7           | 2,8         | ...              | 4           | 5             |             |
| 900                 | 2,2                        | 2,4         | 2,9           | 3           | ...              |             |               |             |
| 1200                | 2,4                        | 2,4         | 3,1           | 3,3         | ...              | 4           | 5             | 5           |
| 1500                | 2,5                        | 2,9         | 3,2           | 3,4         | ...              |             |               |             |
| 1800                | 2,6                        | 3,3         | 3,3           | 3,5         | ...              | 7           | 5             | ...         |
| 2100                | 2,5                        | 3,3         | 3,1           | 3,6         | ...              |             |               |             |
| 2400                | 2,4                        | 3,4         | 3,5           | 3,7         | ...              | ...         | ...           | ...         |
| 2700                | 2,8                        | 3,5         | 3,6           | 3,8         | ...              |             |               |             |
| 3000                | 3                          | 3,7         | 3,8           | 3,9         | ...              | ...         | ...           | ...         |
| 3300                | 3,3                        | 4,1         | 4,2           | 4,4         | ...              |             |               |             |
| 3600                | 3,5                        | 4,2         | 4,4           | 4,6         | ...              | ...         | ...           | ...         |
| 3900                | 3,8                        | 4,4         | 4,6           | 5           | ...              |             |               |             |
| 4200                | 4,1                        | 4,4         | 4,7           | 5,2         | ...              | ...         | ...           | ...         |
| 4500                | 4,3                        | 4,5         | 5             | 5,5         | ...              |             |               |             |
| 4800                | 4,4                        | 4,7         | 5,2           | 5,9         | ...              | ...         | ...           | ...         |
| 5100                | 4,8                        | 4,9         | 5,5           | 6,3         | ...              |             |               |             |

“...” – arraste de gotas.

Obs.: Neste experimento ocorreu arraste a uma taxa reduzida, quase imperceptível.

**Experimento de Hidrodinâmica 25**

G = 80 l/min

recheio02

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 2,2                        | 2,9         | 2,9           | 3,3         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 300                 | 2,9                        | 3,8         | 4,2           | 4,3         | 8                | 18          | 16            | 20          |
| 600                 | 3,1                        | 4,2         | 4,2           | 4,5         | 7                | 14          | 16            | 15          |
| 900                 | 3,4                        | 4,2         | 4,4           | 4,5         |                  |             |               |             |
| 1200                | 4,3                        | 4,6         | 4,7           | 4,6         | 24               | 24          | 29            | 22          |
| 1500                | 4,8                        | 5,1         | 5             | 4,5         |                  |             |               |             |
| 1800                | 5                          | 5,5         | 5,3           | 4,7         | 26               | 42          | 28            | 22          |
| 2100                | 5,2                        | 6,1         | 5,2           | 5           |                  |             |               |             |
| 2400                | 5,4                        | 6,5         | 5,5           | 5,3         | 16               | 38          | 33            | 18          |
| 2700                | 5,6                        | 6,5         | 6,2           | 5,5         |                  |             |               |             |
| 3000                | 5,7                        | 6,7         | 6,7           | 5,6         |                  | 37          | 37            | 17          |
| 3300                | 6,1                        | 6,8         | 6,9           | 6,2         | 15               |             |               |             |
| 3600                | 6,3                        | 6,9         | 7             | 6,5         | 14               | 20          | 20            | 7           |
| 3900                | 6,2                        | 7           | 7,2           | 6,3         |                  |             |               |             |
| 4200                | 6,4                        | 7,2         | 7,1           | 6,5         | 11               | 17          | 10            | ...         |
| 4500                | 7                          | 7,8         | 7,2           | 6,7         |                  |             |               |             |
| 4800                | 7,2                        | 7,2         | 7,1           | 6,9         | 16               | ...         | ...           | ...         |
| 5100                | 7,9                        | 7,2         | 7,2           | 7,2         |                  |             |               |             |

(...) – arraste de gotas.

Obs.: Para as vazões utilizadas neste experimento foi observado arraste de líquido pela fase gasosa.

**Experimento de Hidrodinâmica 26**

L = 0 l/min (dry bed)

recheio01

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |            |            |            |            |            |
|---------------------|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                     | G=10 l/min                 | G=20 l/min | G=30 l/min | G=45 l/min | G=60 l/min | G=80 l/min |
| 0                   | 0                          | 0,1        | 0,4        | 0,7        | 0,9        | 1,6        |
| 300                 | 0                          | 0,2        | 0,5        | 0,7        | 1          | 1,8        |
| 600                 | 0,1                        | 0,2        | 0,5        | 0,8        | 1,1        | 1,9        |
| 900                 | 0,2                        | 0,3        | 0,6        | 0,9        | 1,1        | 2          |
| 1200                | 0,3                        | 0,4        | 0,7        | 1,1        | 1,2        | 2,1        |
| 1500                | 0,4                        | 0,5        | 0,9        | 1,3        | 1,4        | 2,2        |
| 1800                | 0,5                        | 0,6        | 1,1        | 1,6        | 1,7        | 2,4        |
| 2100                | 0,6                        | 0,8        | 1,2        | 1,7        | 2          | 2,7        |
| 2400                | 0,8                        | 1          | 1,4        | 1,8        | 2,2        | 2,9        |
| 2700                | 1,1                        | 1,3        | 1,7        | 2          | 2,5        | 3,1        |
| 3000                | 1,3                        | 1,5        | 1,9        | 2,2        | 2,8        | 3,3        |
| 3300                | 1,5                        | 1,8        | 2,2        | 2,5        | 3          | 3,6        |
| 3600                | 1,8                        | 2          | 2,5        | 2,9        | 3,4        | 3,9        |
| 3900                | 2,1                        | 2,3        | 2,8        | 3,3        | 3,7        | 4,2        |
| 4200                | 2,4                        | 2,7        | 3,1        | 3,6        | 4,1        | 4,6        |
| 4500                | 2,7                        | 3,1        | 3,5        | 4          | 4,3        | 4,9        |
| 4800                | 3                          | 3,4        | 3,8        | 4,4        | 4,7        | 5,4        |
| 5100                | 3,3                        | 3,7        | 4,2        | 4,8        | 5,2        | 5,9        |

**Experimento de Hidrodinâmica 27**

G = 10 l/min

recheio01

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0                          | 0           | 0,05          | 0,1         |                  |             |               |             |
| 300                 | 0,05                       | 0,1         | 0,1           | 0,1         |                  |             |               |             |
| 600                 | 0,1                        | 0,15        | 0,15          | 0,15        |                  |             |               |             |
| 900                 | 0,2                        | 0,2         | 0,2           | 0,3         |                  |             |               |             |
| 1200                | 0,3                        | 0,3         | 0,35          | 0,4         |                  |             |               |             |
| 1500                | 0,4                        | 0,45        | 0,5           | 0,5         |                  |             |               |             |
| 1800                | 0,5                        | 0,6         | 0,7           | 0,7         |                  |             |               |             |
| 2100                | 0,7                        | 0,8         | 0,9           | 1           |                  |             |               |             |
| 2400                | 0,9                        | 1           | 1,1           | 1,1         |                  |             |               |             |
| 2700                | 1,2                        | 1,3         | 1,3           | 1,4         |                  |             |               |             |
| 3000                | 1,4                        | 1,5         | 1,6           | 1,6         |                  |             |               |             |
| 3300                | 1,7                        | 1,8         | 1,8           | 1,9         |                  |             |               |             |
| 3600                | 2                          | 2,1         | 2,1           | 2,2         |                  |             |               |             |
| 3900                | 2,3                        | 2,5         | 2,5           | 2,6         |                  |             |               |             |
| 4200                | 2,6                        | 2,7         | 2,8           | 2,9         |                  |             |               |             |
| 4500                | 2,9                        | 3           | 3,1           | 3,2         |                  |             |               |             |
| 4800                | 3,3                        | 3,4         | 3,5           | 3,6         |                  |             |               |             |
| 5100                | 3,6                        | 3,7         | 3,8           | 3,9         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste em toda faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 28**

G = 20 l/min

recheio01

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0,1                        | 0,1         | 0,2           | 0,2         |                  |             |               |             |
| 300                 | 0,2                        | 0,2         | 0,3           | 0,3         |                  |             |               |             |
| 600                 | 0,3                        | 0,3         | 0,3           | 0,3         |                  |             |               |             |
| 900                 | 0,4                        | 0,3         | 0,4           | 0,5         |                  |             |               |             |
| 1200                | 0,5                        | 0,5         | 0,5           | 0,6         |                  |             |               |             |
| 1500                | 0,6                        | 0,6         | 0,6           | 0,7         |                  |             |               |             |
| 1800                | 0,8                        | 0,8         | 0,8           | 0,9         |                  |             |               |             |
| 2100                | 1                          | 1           | 1             | 1,1         |                  |             |               |             |
| 2400                | 1,2                        | 1,2         | 1,2           | 1,3         |                  |             |               |             |
| 2700                | 1,4                        | 1,4         | 1,5           | 1,5         |                  |             |               |             |
| 3000                | 1,7                        | 1,7         | 1,7           | 1,8         |                  |             |               |             |
| 3300                | 2                          | 2           | 2             | 2,1         |                  |             |               |             |
| 3600                | 2,2                        | 2,2         | 2,3           | 2,4         |                  |             |               |             |
| 3900                | 2,5                        | 2,6         | 2,6           | 2,7         |                  |             |               |             |
| 4200                | 2,8                        | 2,8         | 2,8           | 2,9         |                  |             |               |             |
| 4500                | 3,1                        | 3,2         | 3,3           | 3,4         |                  |             |               |             |
| 4800                | 3,4                        | 3,5         | 3,6           | 3,8         |                  |             |               |             |
| 5100                | 3,8                        | 3,9         | 4             | 4,1         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste em toda faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 29**

G = 30 l/min

recheio01

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0,4                        | 0,4         | 0,5           | 0,4         |                  |             |               |             |
| 300                 | 0,5                        | 0,5         | 0,6           | 0,6         |                  |             |               |             |
| 600                 | 0,6                        | 0,6         | 0,7           | 0,7         |                  |             |               |             |
| 900                 | 0,7                        | 0,7         | 0,8           | 0,7         |                  |             |               |             |
| 1200                | 0,8                        | 0,8         | 0,9           | 0,8         |                  |             |               |             |
| 1500                | 1                          | 1           | 1,1           | 0,9         |                  |             |               |             |
| 1800                | 1,2                        | 1,2         | 1,3           | 1,1         |                  |             |               |             |
| 2100                | 1,4                        | 1,4         | 1,5           | 1,3         |                  |             |               |             |
| 2400                | 1,6                        | 1,7         | 1,8           | 1,5         |                  |             |               |             |
| 2700                | 1,8                        | 1,9         | 2             | 1,7         |                  |             |               |             |
| 3000                | 2,1                        | 2,2         | 2,3           | 1,9         |                  |             |               |             |
| 3300                | 2,4                        | 2,5         | 2,6           | 2,3         |                  |             |               |             |
| 3600                | 2,6                        | 2,8         | 2,9           | 2,7         |                  |             |               |             |
| 3900                | 3                          | 3,1         | 3,2           | 3           |                  |             |               |             |
| 4200                | 3,3                        | 3,5         | 3,5           | 3,3         |                  |             |               |             |
| 4500                | 3,6                        | 3,7         | 3,8           | 3,7         |                  |             |               |             |
| 4800                | 3,8                        | 4,1         | 4,2           | 4,1         |                  |             |               |             |
| 5100                | 4,2                        | 4,5         | 4,7           | 4,4         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste em toda faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 30**

G = 45 l/min

recheio01

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0,6                        | 1,3         | 1,4           | 0,8         |                  |             |               |             |
| 300                 | 0,7                        | 1,4         | 1,4           | 1,1         |                  |             |               |             |
| 600                 | 0,8                        | 1,6         | 1,6           | 1,3         |                  |             |               |             |
| 900                 | 0,9                        | 1,8         | 1,9           | 1,4         |                  |             |               |             |
| 1200                | 1,1                        | 2           | 2             | 1,6         |                  |             |               |             |
| 1500                | 1,3                        | 2,2         | 2,2           | 1,8         |                  |             |               |             |
| 1800                | 1,5                        | 2,3         | 2,3           | 2,4         |                  |             |               |             |
| 2100                | 1,7                        | 2,6         | 2,3           | 2,8         |                  |             |               |             |
| 2400                | 1,9                        | 2,8         | 2,4           | 3           |                  |             |               |             |
| 2700                | 2,1                        | 3           | 2,7           | 3,2         |                  |             |               |             |
| 3000                | 2,4                        | 3,3         | 2,9           | 3,4         |                  |             |               |             |
| 3300                | 2,8                        | 3,6         | 3,2           | 3,5         |                  |             |               |             |
| 3600                | 3,1                        | 4           | 3,4           | 3,7         |                  |             |               |             |
| 3900                | 3,4                        | 4,2         | 3,7           | 3,8         |                  |             |               |             |
| 4200                | 3,7                        | 4,4         | 4,1           | 4,4         |                  |             |               |             |
| 4500                | 4                          | 4,7         | 4,4           | 4,5         |                  |             |               |             |
| 4800                | 4,4                        | 5           | 4,6           | 4,6         |                  |             |               |             |
| 5100                | 4,7                        | 5,3         | 5,1           | 4,9         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 31**

G = 60 l/min

recheio01

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 2,2                        | 2,3         | 2             | 2,1         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 300                 | 2,5                        | 2,7         | 2,3           | 2,4         | 0                | 3           | 6             | 4           |
| 600                 | 2,8                        | 2,8         | 2,7           | 2,6         |                  |             |               |             |
| 900                 | 3,3                        | 2,9         | 2,8           | 2,7         | ...              | 4,5         | 5             | 3,5         |
| 1200                | 3,5                        | 3,3         | 3,4           | 3,2         |                  |             |               |             |
| 1500                | 3,3                        | 3,5         | 3,4           | 3,3         | ...              | 9           | 3             | 3,5         |
| 1800                | 3,6                        | 3,9         | 3,5           | 3,6         |                  |             |               |             |
| 2100                | 3,7                        | 3,7         | 3,4           | 3,8         | ...              | 6           | ...           | ...         |
| 2400                | 3,9                        | 3,8         | 3,5           | 3,9         |                  |             |               |             |
| 2700                | 4,2                        | 3,9         | 3,8           | 4           | ...              | ...         | ...           | ...         |
| 3000                | 4,5                        | 4,1         | 4,2           | 4,1         |                  |             |               |             |
| 3300                | 4,8                        | 4,3         | 4,5           | 4,5         | 0                | ...         | ...           | 0           |
| 3600                | 5,1                        | 4,8         | 4,7           | 4,7         |                  |             |               |             |
| 3900                | 5,2                        | 5,1         | 4,9           | 4,9         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 4200                | 5,3                        | 5,3         | 5,2           | 5,1         |                  |             |               |             |
| 4500                | 5,4                        | 5,4         | 5,4           | 5,4         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 4800                | 5,5                        | 5,5         | 5,6           | 5,7         |                  |             |               |             |
| 5100                | 6,1                        | 5,8         | 5,9           | 6,2         | 0                | 0           | 0             | 0           |

(...) – arraste de gotas.

Obs.: Neste experimento foi observado arraste para uma certa faixa de velocidade de rotação, entretanto, acima de 3600 rpm não foi observado arraste.

**Experimento de Hidrodinâmica 32**

G = 80 l/min

recheio01

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 2,7                        | 2,7         | 3,1           | 3,4         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 300                 | 3,6                        | 3,8         | 4,4           | 4,7         | 10               | 18          | 17            | 19          |
| 600                 | 3,8                        | 5,1         | 5,9           | 4,9         |                  |             |               |             |
| 900                 | 4,1                        | 5,5         | 5,9           | 5,2         | 15               | 22          | 25            | 21          |
| 1200                | 4,7                        | 5,3         | 5,7           | 5,6         |                  |             |               |             |
| 1500                | 5,1                        | 5,8         | 5,9           | 5,7         | 31               | 38          | 33            | 27          |
| 1800                | 5,6                        | 5,9         | 6             | 5,8         |                  |             |               |             |
| 2100                | 5,7                        | 7,2         | 6,1           | 6           | 29               | 41          | 36            | 23          |
| 2400                | 5,9                        | 8,3         | 6,2           | 6,1         |                  |             |               |             |
| 2700                | 6,1                        | 8,8         | 6,6           | 6,3         | 23               | 45          | 32            | 20          |
| 3000                | 6,2                        | 8,5         | 7,1           | 6,5         |                  |             |               |             |
| 3300                | 6,5                        | 8,2         | 7,2           | 6,8         | 16               | 32          | 29            | 17          |
| 3600                | 6,7                        | 7,6         | 7,9           | 8           |                  |             |               |             |
| 3900                | 6,9                        | 7,8         | 8,2           | 8,3         | 14               | 25          | 23            | 8           |
| 4200                | 7,2                        | 7,9         | 7,6           | 7,9         |                  |             |               |             |
| 4500                | 7,6                        | 8,2         | 7,9           | 8,1         | 18               | 14          | 9             | 0           |
| 4800                | 8,1                        | 8,1         | 8,2           | 8,1         |                  |             |               |             |
| 5100                | 8,5                        | 8,3         | 8,2           | 8,3         | 27               | ...         | 0             | 0           |

Obs.: Para a vazão de ar de 80 l/min o arraste de líquido foi grande, entretanto para a vazão de líquido de 2,0 l/min o arraste foi menor comprovando o efeito da velocidade de injeção.

**Experimento de Hidrodinâmica 33**

L = 0 l/min (dry bed)

recheio03

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |            |            |            |            |            |
|---------------------|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                     | G=10 l/min                 | G=20 l/min | G=30 l/min | G=45 l/min | G=60 l/min | G=80 l/min |
| 0                   | 0                          | 0,05       | 0,2        | 0,3        | 0,4        | 0,9        |
| 300                 | 0                          | 0,1        | 0,3        | 0,3        | 0,4        | 1,1        |
| 600                 | 0,05                       | 0,1        | 0,4        | 0,4        | 0,5        | 1,2        |
| 900                 | 0,1                        | 0,2        | 0,5        | 0,5        | 0,6        | 1,4        |
| 1200                | 0,2                        | 0,3        | 0,6        | 0,6        | 0,8        | 1,6        |
| 1500                | 0,3                        | 0,5        | 0,7        | 0,8        | 0,9        | 1,6        |
| 1800                | 0,5                        | 0,6        | 0,9        | 1          | 1,1        | 1,7        |
| 2100                | 0,7                        | 0,8        | 1,1        | 1,1        | 1,4        | 1,9        |
| 2400                | 0,9                        | 1          | 1,3        | 1,4        | 1,7        | 2,1        |
| 2700                | 1,1                        | 1,1        | 1,5        | 1,6        | 2          | 2,6        |
| 3000                | 1,3                        | 1,4        | 1,7        | 1,8        | 2,4        | 2,9        |
| 3300                | 1,5                        | 1,6        | 1,9        | 2,1        | 2,7        | 3,1        |
| 3600                | 1,8                        | 1,9        | 2,1        | 2,3        | 3          | 3,3        |
| 3900                | 2                          | 2,1        | 2,4        | 2,8        | 3,2        | 3,6        |
| 4200                | 2,2                        | 2,3        | 2,7        | 3,2        | 3,5        | 4          |
| 4500                | 2,6                        | 2,7        | 3,1        | 3,6        | 3,9        | 4,3        |
| 4800                | 2,9                        | 2,9        | 3,4        | 3,9        | 4,3        | 4,7        |
| 5100                | 3,2                        | 3,4        | 3,7        | 4,2        | 4,6        | 5,2        |

**Experimento de Hidrodinâmica 34**

G = 10 l/min

recheio03

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0                          | 0           | 0             | 0           |                  |             |               |             |
| 300                 | 0                          | 0           | 0             | 0           |                  |             |               |             |
| 600                 | 0                          | 0           | 0             | 0           |                  |             |               |             |
| 900                 | 0                          | 0,1         | 0,1           | 0,1         |                  |             |               |             |
| 1200                | 0,1                        | 0,2         | 0,2           | 0,3         |                  |             |               |             |
| 1500                | 0,2                        | 0,3         | 0,4           | 0,4         |                  |             |               |             |
| 1800                | 0,4                        | 0,5         | 0,5           | 0,6         |                  |             |               |             |
| 2100                | 0,6                        | 0,6         | 0,7           | 0,8         |                  |             |               |             |
| 2400                | 0,8                        | 0,8         | 0,9           | 1           |                  |             |               |             |
| 2700                | 1                          | 1           | 1,1           | 1,2         |                  |             |               |             |
| 3000                | 1,2                        | 1,3         | 1,4           | 1,5         |                  |             |               |             |
| 3300                | 1,5                        | 1,6         | 1,6           | 1,7         |                  |             |               |             |
| 3600                | 1,8                        | 1,9         | 1,9           | 2           |                  |             |               |             |
| 3900                | 2,2                        | 2,2         | 2,2           | 2,3         |                  |             |               |             |
| 4200                | 2,5                        | 2,5         | 2,6           | 2,6         |                  |             |               |             |
| 4500                | 2,8                        | 2,9         | 2,9           | 3           |                  |             |               |             |
| 4800                | 3,2                        | 3,3         | 3,3           | 3,3         |                  |             |               |             |
| 5100                | 3,6                        | 3,8         | 3,7           | 3,8         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido em toda faixa testada.

### Experimento de Hidrodinâmica 35

G = 20 l/min

recheio03

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0,1                        | 0,1         | 0,1           | 0,1         |                  |             |               |             |
| 300                 | 0,15                       | 0,1         | 0,2           | 0,2         |                  |             |               |             |
| 600                 | 0,2                        | 0,2         | 0,25          | 0,3         |                  |             |               |             |
| 900                 | 0,2                        | 0,3         | 0,3           | 0,4         |                  |             |               |             |
| 1200                | 0,3                        | 0,4         | 0,4           | 0,5         |                  |             |               |             |
| 1500                | 0,5                        | 0,5         | 0,5           | 0,6         |                  |             |               |             |
| 1800                | 0,6                        | 0,6         | 0,7           | 0,8         |                  |             |               |             |
| 2100                | 0,8                        | 0,7         | 0,9           | 0,9         |                  |             |               |             |
| 2400                | 1                          | 1           | 1,1           | 1,2         |                  |             |               |             |
| 2700                | 1,2                        | 1,2         | 1,3           | 1,4         |                  |             |               |             |
| 3000                | 1,5                        | 1,5         | 1,6           | 1,7         |                  |             |               |             |
| 3300                | 1,7                        | 1,8         | 1,8           | 1,9         |                  |             |               |             |
| 3600                | 2                          | 2,1         | 2,1           | 2,2         |                  |             |               |             |
| 3900                | 2,3                        | 2,3         | 2,4           | 2,5         |                  |             |               |             |
| 4200                | 2,6                        | 2,7         | 2,7           | 2,8         |                  |             |               |             |
| 4500                | 3                          | 3           | 3,1           | 3,1         |                  |             |               |             |
| 4800                | 3,4                        | 3,3         | 3,5           | 3,5         |                  |             |               |             |
| 5100                | 3,7                        | 3,8         | 3,9           | 3,9         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido na faixa estudada.

### Experimento de Hidrodinâmica 36

G = 30 l/min

recheio03

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0,2                        | 0,3         | 0,3           | 0,2         |                  |             |               |             |
| 300                 | 0,3                        | 0,4         | 0,4           | 0,3         |                  |             |               |             |
| 600                 | 0,4                        | 0,4         | 0,5           | 0,3         |                  |             |               |             |
| 900                 | 0,5                        | 0,5         | 0,6           | 0,4         |                  |             |               |             |
| 1200                | 0,6                        | 0,6         | 0,7           | 0,5         |                  |             |               |             |
| 1500                | 0,7                        | 0,7         | 0,8           | 0,7         |                  |             |               |             |
| 1800                | 0,9                        | 0,8         | 1             | 0,9         |                  |             |               |             |
| 2100                | 1,1                        | 1           | 1,2           | 1,1         |                  |             |               |             |
| 2400                | 1,4                        | 1,3         | 1,4           | 1,3         |                  |             |               |             |
| 2700                | 1,6                        | 1,5         | 1,6           | 1,5         |                  |             |               |             |
| 3000                | 1,8                        | 1,7         | 1,9           | 1,7         |                  |             |               |             |
| 3300                | 2,1                        | 2           | 2,1           | 2           |                  |             |               |             |
| 3600                | 2,4                        | 2,4         | 2,4           | 2,3         |                  |             |               |             |
| 3900                | 2,7                        | 2,6         | 2,6           | 2,6         |                  |             |               |             |
| 4200                | 3                          | 2,9         | 3             | 3           |                  |             |               |             |
| 4500                | 3,4                        | 3,4         | 3,4           | 3,5         |                  |             |               |             |
| 4800                | 3,8                        | 3,8         | 3,9           | 3,8         |                  |             |               |             |
| 5100                | 4,3                        | 4,3         | 4,2           | 4,2         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido em toda faixa estudada.

**Experimento de Hidrodinâmica 37**

G = 45 l/min

recheio03

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0,2                        | 0,4         | 0,3           | 0,5         |                  |             |               |             |
| 300                 | 0,3                        | 0,5         | 0,5           | 0,6         |                  |             |               |             |
| 600                 | 0,5                        | 0,6         | 0,6           | 0,6         |                  |             |               |             |
| 900                 | 0,6                        | 0,7         | 0,7           | 0,7         |                  |             |               |             |
| 1200                | 0,6                        | 0,8         | 0,9           | 0,8         |                  |             |               |             |
| 1500                | 0,7                        | 0,9         | 1             | 0,9         |                  |             |               |             |
| 1800                | 0,8                        | 0,9         | 1,1           | 1,2         |                  |             |               |             |
| 2100                | 1                          | 1,2         | 1,2           | 1,4         |                  |             |               |             |
| 2400                | 1,2                        | 1,3         | 1,4           | 1,5         |                  |             |               |             |
| 2700                | 1,4                        | 1,5         | 1,5           | 1,7         |                  |             |               |             |
| 3000                | 1,7                        | 1,7         | 1,7           | 1,9         |                  |             |               |             |
| 3300                | 1,9                        | 2           | 2             | 2,2         |                  |             |               |             |
| 3600                | 2,1                        | 2,2         | 2,3           | 2,5         |                  |             |               |             |
| 3900                | 2,4                        | 2,5         | 2,6           | 2,7         |                  |             |               |             |
| 4200                | 3                          | 2,9         | 3             | 3,1         |                  |             |               |             |
| 4500                | 3,4                        | 3,4         | 3,3           | 3,5         |                  |             |               |             |
| 4800                | 3,8                        | 3,7         | 3,7           | 3,8         |                  |             |               |             |
| 5100                | 4,2                        | 4,2         | 4,1           | 4,2         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste em toda a faixa testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 38**

G = 60 l/min

recheio03

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 0,3                        | 0,5         | 0,6           | 1           |                  |             |               |             |
| 300                 | 0,5                        | 0,7         | 0,9           | 1,3         |                  |             |               |             |
| 600                 | 0,6                        | 0,8         | 1,1           | 1,4         |                  |             |               |             |
| 900                 | 0,8                        | 1           | 1,3           | 1,5         |                  |             |               |             |
| 1200                | 1,2                        | 1,3         | 1,4           | 1,8         |                  |             |               |             |
| 1500                | 1,5                        | 1,6         | 1,7           | 2           |                  |             |               |             |
| 1800                | 1,7                        | 2,1         | 2             | 2,2         |                  |             |               |             |
| 2100                | 1,9                        | 2,2         | 2,2           | 2,2         |                  |             |               |             |
| 2400                | 2,2                        | 2,3         | 2,6           | 2,4         |                  |             |               |             |
| 2700                | 2,4                        | 2,5         | 2,7           | 2,9         |                  |             |               |             |
| 3000                | 2,7                        | 2,7         | 2,9           | 3,1         |                  |             |               |             |
| 3300                | 3                          | 3,1         | 3,1           | 3,2         |                  |             |               |             |
| 3600                | 3,3                        | 3,3         | 3,4           | 3,5         |                  |             |               |             |
| 3900                | 3,6                        | 3,9         | 3,8           | 3,9         |                  |             |               |             |
| 4200                | 3,9                        | 4,2         | 4,1           | 4,2         |                  |             |               |             |
| 4500                | 4,3                        | 4,5         | 4,4           | 4,5         |                  |             |               |             |
| 4800                | 4,7                        | 4,8         | 4,7           | 4,9         |                  |             |               |             |
| 5100                | 5,1                        | 5,3         | 5,2           | 5,3         |                  |             |               |             |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido para as condições operacionais testadas.



**Experimento de Hidrodinâmica 39**

G = 80 l/min

recheio03

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               |             | Arraste (ml/min) |             |               |             |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 2 l/min |
| 0                   | 1,4                        | 1,8         | 1,7           | 1,8         | 0                | 0           | 0             | 0           |
| 300                 | 2,1                        | 2,4         | 2,1           | 2,5         | ...              | 12          | 16            | 13          |
| 600                 | 2,1                        | 2,9         | 3             | 2,9         | ...              |             |               |             |
| 900                 | 2,2                        | 3,1         | 3,3           | 3,1         | ...              | 10          | 11            | 5           |
| 1200                | 2,7                        | 3,4         | 3,5           | 2,9         | 6                |             |               |             |
| 1500                | 3,2                        | 3,7         | 3,6           | 3           |                  | 6           | 4             | ...         |
| 1800                | 3,6                        | 3,8         | 3,4           | 3,1         | 15               | 5           | ...           | ...         |
| 2100                | 3,7                        | 3,9         | 3,6           | 3,2         |                  |             |               |             |
| 2400                | 3,8                        | 4,1         | 3,8           | 3,5         | 6                | 8           | 5             | ...         |
| 2700                | 4,2                        | 4,6         | 4,5           | 4           |                  |             |               |             |
| 3000                | 4,6                        | 5,1         | 5,3           | 4,6         | 7                | 8           | 11            | ...         |
| 3300                | 4,7                        | 5,3         | 5,3           | 5,1         |                  |             |               |             |
| 3600                | 5,1                        | 5,5         | 5,4           | 5,2         | 8                | ...         | ...           | ...         |
| 3900                | 5,5                        | 5,6         | 5,5           | 5,5         |                  |             |               |             |
| 4200                | 5,9                        | 5,8         | 5,6           | 5,6         | 9                | ...         | ...           | ...         |
| 4500                | 6,3                        | 6           | 5,8           | 5,8         |                  |             |               |             |
| 4800                | 6,8                        | 6,2         | 6             | 6,1         | 7                | ...         | ...           | ...         |
| 5100                | 7,4                        | 6,6         | 6,5           | 6,6         |                  |             |               |             |

Obs.: Para as vazões utilizadas neste experimento ocorreu arraste de líquido pela fase gasosa.

**Experimento de Hidrodinâmica 40**

G = 60 l/min

recheio04

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               | Arraste (ml/min) |             |               |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|------------------|-------------|---------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min |
| 0                   | 1,7                        | 2           | 1,9           |                  |             |               |
| 300                 | 2                          | 2,4         | 2,2           |                  |             |               |
| 600                 | 2,2                        | 2,6         | 2,3           |                  |             |               |
| 900                 | 2,3                        | 3           | 2,4           |                  |             |               |
| 1200                | 2,4                        | 3,2         | 2,6           |                  |             |               |
| 1500                | 2,7                        | 3,4         | 2,8           |                  |             |               |
| 1800                | 2,9                        | 3,7         | 3,1           |                  |             |               |
| 2100                | 3,3                        | 3,9         | 3,3           |                  |             |               |
| 2400                | 3,6                        | 4,2         | 3,6           |                  |             |               |
| 2700                | 3,8                        | 4,4         | 3,9           |                  |             |               |
| 3000                | 4,2                        | 4,7         | 4,3           |                  |             |               |
| 3300                | 4,4                        | 4,9         | 4,6           |                  |             |               |
| 3600                | 4,7                        | 5,2         | 4,9           |                  |             |               |
| 3900                | 5,1                        | 5,4         | 5,5           |                  |             |               |
| 4200                | 5,4                        | 5,5         | 5,6           |                  |             |               |
| 4500                | 5,7                        | 5,8         | 5,9           |                  |             |               |
| 4800                | 5,9                        | 6,2         | 6,4           |                  |             |               |
| 5100                | 6,3                        | 6,6         | 6,6           |                  |             |               |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido em toda faixa operacional testada.

**Experimento de Hidrodinâmica 41**

G = 45 l/min

recheio04

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               | Arraste (ml/min) |             |               |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|------------------|-------------|---------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min |
| 0                   | 0,7                        | 1           | 1,2           |                  |             |               |
| 300                 | 0,9                        | 1,1         | 1,3           |                  |             |               |
| 600                 | 1                          | 1,2         | 1,4           |                  |             |               |
| 900                 | 1,1                        | 1,3         | 1,5           |                  |             |               |
| 1200                | 1,2                        | 1,4         | 1,6           |                  |             |               |
| 1500                | 1,4                        | 1,5         | 1,8           |                  |             |               |
| 1800                | 1,5                        | 1,6         | 1,9           |                  |             |               |
| 2100                | 1,8                        | 1,8         | 2             |                  |             |               |
| 2400                | 2,1                        | 2           | 2,2           |                  |             |               |
| 2700                | 2,4                        | 2,3         | 2,4           |                  |             |               |
| 3000                | 2,6                        | 2,5         | 2,6           |                  |             |               |
| 3300                | 2,8                        | 2,8         | 2,9           |                  |             |               |
| 3600                | 3,3                        | 3,2         | 3,2           |                  |             |               |
| 3900                | 3,5                        | 3,4         | 3,5           |                  |             |               |
| 4200                | 4                          | 3,9         | 3,8           |                  |             |               |
| 4500                | 4,2                        | 4,2         | 4,1           |                  |             |               |
| 4800                | 4,6                        | 4,5         | 4,5           |                  |             |               |
| 5100                | 4,9                        | 4,9         | 4,8           |                  |             |               |

Obs.: Não ocorreu arraste em toda a faixa de operação testada no experimento.

**Experimento de Hidrodinâmica 42**

G = 60 l/min

recheio04

Injetor 03 (diâmetro=3,0mm)

| Velocidade<br>(rpm) | Queda de Pressão (cm água) |             |               | Arraste (ml/min) |             |               |
|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|------------------|-------------|---------------|
|                     | L = 0,5 l/min              | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min | L = 0,5 l/min    | L = 1 l/min | L = 1,5 l/min |
| 0                   | 0,4                        | 0,5         | 0,5           |                  |             |               |
| 300                 | 0,5                        | 0,6         | 0,7           |                  |             |               |
| 600                 | 0,8                        | 0,7         | 0,8           |                  |             |               |
| 900                 | 0,8                        | 0,8         | 0,9           |                  |             |               |
| 1200                | 0,9                        | 0,9         | 1             |                  |             |               |
| 1500                | 1                          | 1           | 1,1           |                  |             |               |
| 1800                | 1,1                        | 1,2         | 1,3           |                  |             |               |
| 2100                | 1,3                        | 1,4         | 1,5           |                  |             |               |
| 2400                | 1,5                        | 1,6         | 1,7           |                  |             |               |
| 2700                | 1,8                        | 1,9         | 1,9           |                  |             |               |
| 3000                | 2                          | 2,1         | 2,1           |                  |             |               |
| 3300                | 2,4                        | 2,5         | 2,3           |                  |             |               |
| 3600                | 2,5                        | 2,6         | 2,6           |                  |             |               |
| 3900                | 2,9                        | 2,8         | 2,9           |                  |             |               |
| 4200                | 3,1                        | 3,1         | 3,2           |                  |             |               |
| 4500                | 3,3                        | 3,4         | 3,4           |                  |             |               |
| 4800                | 3,5                        | 3,6         | 3,7           |                  |             |               |
| 5100                | 3,9                        | 3,9         | 4             |                  |             |               |

Obs.: Não foi observado arraste de líquido pela fase gasosa.

# Apêndice B:

Planilhas

Experimentos

Transferência

de Massa

Nesta seção estão listados todas as planilhas referentes aos experimentos de transferência de massa que fundamentam este trabalho de tese.

## B.1 - Experimentos - Determinação dos Coeficientes de Transferência de Massa para o Leito de Recheio Centrífugo.

### B.1.a) Recheio 01 – Anéis de Rashig cerâmicos – Porosidade 0,55

#### Experimento de Transferência de Massa 01

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 01-A            | 18,1                  | 20,0          | 38,61                       |
| 01-B            | 18,1                  | 20,1          | 41,03                       |
| 01-C            | 18,1                  | 20,1          | 41,03                       |
| <b>01-médio</b> | <b>18,1</b>           | <b>20,07</b>  | <b>40,30</b>                |

#### Experimento de Transferência de Massa 02

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 02-A            | 18,1                  | 20,5          | 51,21                       |
| 02-B            | 18,1                  | 20,7          | 56,64                       |
| 02-C            | 18,1                  | 20,6          | 53,90                       |
| <b>02-médio</b> | <b>18,1</b>           | <b>20,60</b>  | <b>53,90</b>                |

#### Experimento de Transferência de Massa 03

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 03-A            | 18,1                  | 20,8          | 59,46                       |
| 03-B            | 18,1                  | 20,7          | 56,64                       |
| 03-C            | 18,1                  | 20,8          | 59,46                       |
| <b>03-médio</b> | <b>18,1</b>           | <b>20,76</b>  | <b>58,32</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 04**

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 04-A            | 18,1                  | 21,3          | 74,58                       |
| 04-B            | 18,1                  | 21,4          | 77,85                       |
| 04-C            | 18,1                  | 21,3          | 74,58                       |
| <b>04-médio</b> | <b>18,1</b>           | <b>21,33</b>  | <b>75,55</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 05**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 05-A            | 17,8                  | 21,4          | 70,95                       |
| 05-B            | 17,8                  | 21,4          | 70,95                       |
| 05-C            | 17,8                  | 21,6          | 75,44                       |
| <b>05-médio</b> | <b>17,8</b>           | <b>21,46</b>  | <b>72,29</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 06**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 06-A            | 17,8                  | 22,0          | 84,63                       |
| 06-B            | 17,8                  | 22,0          | 84,63                       |
| 06-C            | 17,8                  | 22,1          | 86,98                       |
| <b>06-médio</b> | <b>17,8</b>           | <b>22,03</b>  | <b>85,33</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 07**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 07-A            | 17,8                  | 22,9          | 106,46                      |
| 07-B            | 17,8                  | 22,8          | 103,95                      |
| 07-C            | 17,8                  | 22,9          | 106,46                      |
| <b>07-médio</b> | <b>17,8</b>           | <b>22,86</b>  | <b>105,46</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 08**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 08-A            | 17,8                  | 23,3          | 116,72                      |
| 08-B            | 17,8                  | 23,4          | 119,35                      |
| 08-C            | 17,8                  | 23,4          | 119,35                      |
| <b>08-médio</b> | <b>17,8</b>           | <b>23,36</b>  | <b>118,30</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 09**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 09-A            | 18,0                  | 21,3          | 67,87                       |
| 09-B            | 18,0                  | 21,4          | 70,33                       |
| 09-C            | 18,0                  | 21,3          | 67,87                       |
| <b>09-médio</b> | <b>18,0</b>           | <b>21,33</b>  | <b>68,60</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 10**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 10-A            | 18,0                  | 21,8          | 80,51                       |
| 10-B            | 18,0                  | 21,8          | 80,51                       |
| 10-C            | 18,0                  | 21,9          | 83,14                       |
| <b>10-médio</b> | <b>18,0</b>           | <b>21,86</b>  | <b>82,09</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 11**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 11-A            | 18,0                  | 22,6          | 102,60                      |
| 11-B            | 18,0                  | 22,5          | 99,70                       |
| 11-C            | 18,0                  | 22,6          | 102,60                      |
| <b>11-médio</b> | <b>18,0</b>           | <b>22,56</b>  | <b>101,44</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 12**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 12-A            | 18,0                  | 22,9          | 111,57                      |
| 12-B            | 18,0                  | 22,8          | 108,53                      |
| 12-C            | 18,0                  | 23,2          | 120,95                      |
| 12-D            | 18,0                  | 23,1          | 117,77                      |
| <b>12-médio</b> | <b>18,0</b>           | <b>23,00</b>  | <b>114,65</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 13**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 13-A            | 17,9                  | 19,3          | 64,74                       |
| 13-B            | 17,9                  | 19,5          | 78,07                       |
| 13-C            | 17,9                  | 19,4          | 71,20                       |
| <b>13-médio</b> | <b>17,9</b>           | <b>19,40</b>  | <b>93,22</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 14**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 14-A            | 17,9                  | 19,7          | 93,22                       |
| 14-B            | 17,9                  | 19,5          | 78,07                       |
| 14-C            | 17,9                  | 19,6          | 85,39                       |
| <b>14-médio</b> | <b>17,9</b>           | <b>19,60</b>  | <b>85,39</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 15**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 15-A            | 17,9                  | 19,7          | 93,22                       |
| 15-B            | 17,9                  | 19,8          | 101,65                      |
| 15-C            | 17,9                  | 19,8          | 101,65                      |
| <b>15-médio</b> | <b>17,9</b>           | <b>19,76</b>  | <b>98,20</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 16**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 16-A            | 17,9                  | 20,0          | 120,72                      |
| 16-B            | 17,9                  | 19,9          | 110,78                      |
| 16-C            | 17,9                  | 20,1          | 131,65                      |
| <b>16-médio</b> | <b>17,9</b>           | <b>20,00</b>  | <b>120,72</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 17**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 17-A            | 18,1                  | 19,6          | 105,99                      |
| 17-B            | 18,1                  | 19,5          | 96,39                       |
| 17-C            | 18,1                  | 19,5          | 96,39                       |
| <b>17-médio</b> | <b>18,1</b>           | <b>19,53</b>  | <b>99,21</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 18**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 18-A            | 18,1                  | 19,9          | 138,66                      |
| 18-B            | 18,1                  | 19,8          | 127,05                      |
| 18-C            | 18,1                  | 19,7          | 116,19                      |
| <b>18-médio</b> | <b>18,1</b>           | <b>19,80</b>  | <b>127,05</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 19**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número      | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 19-A        | 18,1                  | 20,0          | 151,16                      |
| 19-B        | 18,1                  | 20,0          | 151,16                      |
| 19-C        | 18,1                  | 19,9          | 138,66                      |
| <b>19-D</b> | <b>18,1</b>           | <b>19,96</b>  | <b>146,05</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 20**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 20-A            | 18,0                  | 20,1          | 180,22                      |
| 20-B            | 18,0                  | 20,2          | 196,49                      |
| 20-C            | 18,0                  | 20,1          | 180,22                      |
| <b>20-médio</b> | <b>18,0</b>           | <b>20,13</b>  | <b>184,94</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 21**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 21-A            | 18,0                  | 20,6          | 113,67                      |
| 21-B            | 18,0                  | 20,5          | 108,15                      |
| 21-C            | 18,0                  | 20,5          | 108,15                      |
| <b>21-médio</b> | <b>18,0</b>           | <b>20,53</b>  | <b>109,80</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 22**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 22-A            | 18,0                  | 20,8          | 125,09                      |
| 22-B            | 18,0                  | 20,9          | 131,01                      |
| 22-C            | 18,0                  | 20,9          | 131,01                      |
| <b>22-médio</b> | <b>18,0</b>           | <b>20,87</b>  | <b>129,22</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 23**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 23-A            | 18,0                  | 21,0          | 137,08                      |
| 23-B            | 18,0                  | 21,0          | 137,08                      |
| 23-C            | 18,0                  | 21,1          | 143,31                      |
| <b>23-médio</b> | <b>18,0</b>           | <b>21,03</b>  | <b>138,93</b>               |



**Experimento de Transferência de Massa 24**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 24-A            | 18,0                  | 21,4          | 163,00                      |
| 24-B            | 18,0                  | 21,3          | 156,26                      |
| 24-C            | 18,0                  | 21,4          | 163,00                      |
| <b>24-médio</b> | <b>18,0</b>           | <b>21,37</b>  | <b>160,96</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 25**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 25-A            | 17,3                  | 18,4          | 85,05                       |
| 25-B            | 17,3                  | 18,4          | 85,05                       |
| 25-C            | 17,3                  | 18,4          | 85,05                       |
| <b>25-médio</b> | <b>17,3</b>           | <b>18,40</b>  | <b>85,05</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 26**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 26-A            | 17,3                  | 18,5          | 97,51                       |
| 26-B            | 17,3                  | 18,7          | 127,82                      |
| 26-C            | 17,3                  | 18,6          | 111,60                      |
| <b>26-médio</b> | <b>17,3</b>           | <b>18,60</b>  | <b>111,60</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 27**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 27-A            | 18,0                  | 19,3          | 107,86                      |
| 27-B            | 18,0                  | 19,5          | 141,07                      |
| 27-C            | 18,0                  | 19,4          | 123,19                      |
| <b>27-médio</b> | <b>18,0</b>           | <b>19,40</b>  | <b>123,19</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 28**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 28-A            | 17,3                  | 18,8          | 146,92                      |
| 28-B            | 17,3                  | 18,9          | 170,19                      |
| 28-C            | 17,3                  | 18,7          | 127,82                      |
| <b>28-médio</b> | <b>17,3</b>           | <b>18,80</b>  | <b>146,92</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 29**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 29-A            | 17,4                | 19,4          | 91,25                       |
| 29-B            | 17,4                | 19,5          | 97,35                       |
| 29-C            | 17,4                | 19,6          | 103,67                      |
| <b>29-médio</b> | <b>17,4</b>         | <b>19,50</b>  | <b>97,35</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 30**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 30-A            | 17,4                | 19,7          | 110,23                      |
| 30-B            | 17,4                | 19,7          | 110,23                      |
| 30-C            | 17,4                | 19,7          | 110,23                      |
| <b>30-médio</b> | <b>17,4</b>         | <b>19,70</b>  | <b>110,23</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 31**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 31-A            | 17,4                | 19,9          | 124,13                      |
| 31-B            | 17,4                | 20,1          | 139,24                      |
| 31-C            | 17,4                | 20,0          | 131,52                      |
| <b>31-médio</b> | <b>17,4</b>         | <b>20,00</b>  | <b>131,52</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 32**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 32-A            | 17,4                | 20,2          | 147,31                      |
| 32-B            | 17,4                | 20,3          | 155,78                      |
| 32-C            | 17,4                | 20,1          | 139,24                      |
| <b>32-médio</b> | <b>17,4</b>         | <b>20,20</b>  | <b>147,31</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 33**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 33-A            | 17,8                | 19,8          | 141,24                      |
| 33-B            | 17,8                | 19,9          | 151,23                      |
| 33-C            | 17,8                | 20,0          | 161,67                      |
| <b>33-médio</b> | <b>17,8</b>         | <b>19,90</b>  | <b>151,23</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 34**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 34-A            | 17,8                | 20,1          | 172,61                      |
| 34-B            | 17,8                | 20,0          | 161,67                      |
| 34-C            | 17,8                | 20,0          | 161,67                      |
| <b>34-médio</b> | <b>17,8</b>         | <b>20,03</b>  | <b>164,90</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 35**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 35-A            | 18,4                | 20,8          | 179,75                      |
| 35-B            | 18,4                | 20,8          | 179,75                      |
| 35-C            | 18,4                | 20,8          | 179,75                      |
| <b>35-médio</b> | <b>18,4</b>         | <b>20,80</b>  | <b>179,75</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 36**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 01

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 36-A            | 18,4                | 21,2          | 230,66                      |
| 36-B            | 18,4                | 21,1          | 216,83                      |
| 36-C            | 18,4                | 21,0          | 203,79                      |
| <b>36-médio</b> | <b>18,4</b>         | <b>21,10</b>  | <b>216,83</b>               |

**B.1.b) Recheio 02 – Anéis de Rashig cerâmicos – Porosidade 0,62****Experimento de Transferência de Massa 37**

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 37-A            | 18,1                | 20,0          | 38,61                       |
| 37-B            | 18,1                | 20,2          | 43,49                       |
| 37-C            | 18,1                | 20,3          | 46,01                       |
| <b>37-médio</b> | <b>18,1</b>         | <b>20,17</b>  | <b>42,75</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 38**

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| vNúmero         | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 38-A            | 18,1                  | 20,5          | 51,21                       |
| 38-B            | 18,1                  | 20,4          | 48,58                       |
| 38-C            | 18,1                  | 20,6          | 53,90                       |
| <b>38-médio</b> | <b>18,1</b>           | <b>20,50</b>  | <b>51,21</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 39**

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 39-A            | 18,1                  | 20,7          | 56,64                       |
| 39-B            | 18,1                  | 20,9          | 62,33                       |
| 39-C            | 18,1                  | 20,9          | 62,33                       |
| <b>39-médio</b> | <b>18,1</b>           | <b>20,83</b>  | <b>60,31</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 40**

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 40-A            | 18,1                  | 21,1          | 68,30                       |
| 40-B            | 18,1                  | 21,1          | 68,30                       |
| 40-C            | 18,1                  | 21,2          | 71,40                       |
| <b>40-médio</b> | <b>18,1</b>           | <b>21,13</b>  | <b>69,22</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 41**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 41-A            | 17,4                  | 19,8          | 104,88                      |
| 41-B            | 17,4                  | 20,0          | 116,06                      |
| 41-C            | 17,4                  | 19,9          | 110,41                      |
| <b>41-médio</b> | <b>17,4</b>           | <b>19,90</b>  | <b>110,41</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 42**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 42-A            | 17,4                  | 20,1          | 121,84                      |
| 42-B            | 17,4                  | 20,2          | 127,77                      |
| 42-C            | 17,4                  | 20,0          | 116,06                      |
| <b>42-médio</b> | <b>17,4</b>           | <b>20,10</b>  | <b>121,84</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 43**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 43-A            | 17,4                  | 20,4          | 140,07                      |
| 43-B            | 17,4                  | 20,3          | 133,84                      |
| 43-C            | 17,4                  | 20,5          | 146,47                      |
| <b>43-médio</b> | <b>17,4</b>           | <b>20,40</b>  | <b>140,07</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 44**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 44-A            | 17,4                  | 20,7          | 159,78                      |
| 44-B            | 17,4                  | 20,8          | 166,72                      |
| 44-C            | 17,4                  | 20,6          | 153,03                      |
| <b>44-médio</b> | <b>17,4</b>           | <b>20,70</b>  | <b>159,78</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 45**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 45-A            | 16,4                  | 19,3          | 61,45                       |
| 45-B            | 16,4                  | 19,4          | 63,94                       |
| 45-C            | 16,4                  | 19,2          | 59,00                       |
| <b>45-médio</b> | <b>16,4</b>           | <b>19,30</b>  | <b>61,45</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 46**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 46-A            | 16,4                  | 19,8          | 74,20                       |
| 46-B            | 16,4                  | 19,6          | 69,00                       |
| 46-C            | 16,4                  | 19,7          | 71,58                       |
| <b>46-médio</b> | <b>16,4</b>           | <b>19,70</b>  | <b>71,58</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 47**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 47-A            | 16,4                  | 20,3          | 87,79                       |
| 47-B            | 16,4                  | 20,2          | 85,00                       |
| 47-C            | 16,4                  | 20,1          | 82,24                       |
| <b>47-médio</b> | <b>16,4</b>           | <b>20,20</b>  | <b>85,00</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 48**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 48-A            | 16,4                  | 20,5          | 93,50                       |
| 48-B            | 16,4                  | 20,6          | 96,42                       |
| 48-C            | 16,4                  | 20,4          | 90,63                       |
| <b>48-médio</b> | <b>16,4</b>           | <b>20,50</b>  | <b>93,50</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 49**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 49-A            | 18,4                  | 19,9          | 69,88                       |
| 49-B            | 18,4                  | 20,0          | 76,58                       |
| 49-C            | 18,4                  | 19,8          | 63,57                       |
| <b>49-médio</b> | <b>18,4</b>           | <b>19,90</b>  | <b>69,88</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 50**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 50-A            | 18,4                  | 20,1          | 83,70                       |
| 50-B            | 18,4                  | 20,1          | 83,70                       |
| 50-C            | 18,4                  | 20,2          | 91,32                       |
| <b>50-médio</b> | <b>18,4</b>           | <b>20,13</b>  | <b>85,93</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 51**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 51-A            | 18,4                  | 20,3          | 99,50                       |
| 51-B            | 18,4                  | 20,4          | 108,33                      |
| 51-C            | 18,4                  | 20,3          | 99,50                       |
| <b>51-médio</b> | <b>18,4</b>           | <b>20,33</b>  | <b>102,08</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 52**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 52-A            | 18,4                  | 20,5          | 117,93                      |
| 52-B            | 18,4                  | 20,6          | 128,45                      |
| 52-C            | 18,4                  | 20,6          | 128,45                      |
| <b>52-médio</b> | <b>18,4</b>           | <b>20,56</b>  | <b>124,12</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 53**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 53-A            | 18,3                  | 19,6          | 86,69                       |
| 53-B            | 18,3                  | 19,7          | 95,69                       |
| 53-C            | 18,3                  | 19,8          | 105,21                      |
| <b>53-médio</b> | <b>18,3</b>           | <b>19,70</b>  | <b>95,69</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 54**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 54-A            | 18,3                  | 19,9          | 115,30                      |
| 54-B            | 18,3                  | 20,0          | 126,04                      |
| 54-C            | 18,3                  | 20,1          | 137,53                      |
| <b>54-médio</b> | <b>18,3</b>           | <b>20,00</b>  | <b>126,04</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 55**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 55-A            | 17,4                  | 19,4          | 167,05                      |
| 55-B            | 17,4                  | 19,2          | 140,29                      |
| 55-C            | 17,4                  | 19,3          | 153,13                      |
| <b>55-médio</b> | <b>17,4</b>           | <b>19,30</b>  | <b>153,13</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 56**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 56-A            | 17,4                  | 19,5          | 182,24                      |
| 56-B            | 17,4                  | 19,5          | 182,24                      |
| 56-C            | 17,4                  | 19,6          | 198,96                      |
| <b>56-médio</b> | <b>17,4</b>           | <b>19,53</b>  | <b>187,08</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 57**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 57-A            | 17,7                  | 21,4          | 74,64                       |
| 57-B            | 17,7                  | 21,5          | 76,91                       |
| 57-C            | 17,7                  | 21,3          | 72,38                       |
| <b>57-médio</b> | <b>17,7</b>           | <b>21,40</b>  | <b>74,64</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 58**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 58-A            | 17,7                  | 21,9          | 86,19                       |
| 58-B            | 17,7                  | 22,3          | 95,77                       |
| 58-C            | 17,7                  | 22,2          | 93,35                       |
| <b>58-médio</b> | <b>17,7</b>           | <b>22,13</b>  | <b>91,66</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 59**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 59-A            | 17,7                  | 22,6          | 103,17                      |
| 59-B            | 17,7                  | 22,7          | 105,68                      |
| 59-C            | 17,7                  | 22,8          | 108,22                      |
| <b>59-médio</b> | <b>17,7</b>           | <b>22,70</b>  | <b>105,68</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 60**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 60-A            | 17,7                  | 23,3          | 121,22                      |
| 60-B            | 17,7                  | 23,4          | 123,89                      |
| 60-C            | 17,7                  | 23,5          | 126,59                      |
| <b>60-médio</b> | <b>17,7</b>           | <b>23,40</b>  | <b>123,89</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 61**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 61-A            | 16,3                  | 17,5          | 99,61                       |
| 61-B            | 16,3                  | 17,4          | 86,59                       |
| 61-C            | 16,3                  | 17,3          | 74,96                       |
| <b>61-médio</b> | <b>16,3</b>           | <b>17,40</b>  | <b>86,59</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 62**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 62-A            | 16,3                  | 17,6          | 114,43                      |
| 62-B            | 16,3                  | 17,5          | 99,61                       |
| 62-C            | 16,3                  | 17,6          | 114,43                      |
| <b>62-médio</b> | <b>16,3</b>           | <b>17,56</b>  | <b>108,26</b>               |



**Experimento de Transferência de Massa 63**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 63-A            | 17,2                  | 18,5          | 109,07                      |
| 63-B            | 17,2                  | 18,5          | 109,07                      |
| 63-C            | 17,2                  | 18,6          | 124,91                      |
| <b>63-médio</b> | <b>17,2</b>           | <b>18,53</b>  | <b>113,58</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 64**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 64-A            | 17,2                  | 18,8          | 166,01                      |
| 64-B            | 17,2                  | 18,7          | 143,51                      |
| 64-C            | 17,2                  | 18,8          | 166,01                      |
| <b>64-médio</b> | <b>17,2</b>           | <b>18,76</b>  | <b>156,44</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 65**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 65-A            | 17,6                  | 19,6          | 90,58                       |
| 65-B            | 17,6                  | 19,7          | 96,63                       |
| 65-C            | 17,6                  | 19,5          | 84,74                       |
| <b>65-médio</b> | <b>17,6</b>           | <b>19,60</b>  | <b>90,58</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 66**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 66-A            | 17,6                  | 19,8          | 102,89                      |
| 66-B            | 17,6                  | 19,9          | 109,38                      |
| 66-C            | 17,6                  | 19,7          | 96,63                       |
| <b>66-médio</b> | <b>17,6</b>           | <b>19,80</b>  | <b>102,89</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 67**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 67-A            | 17,6                  | 20,1          | 123,14                      |
| 67-B            | 17,6                  | 20,2          | 130,45                      |
| 67-C            | 17,6                  | 20,0          | 116,12                      |
| <b>67-médio</b> | <b>17,6</b>           | <b>20,10</b>  | <b>123,14</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 68**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 68-A            | 17,6                  | 20,3          | 138,08                      |
| 68-B            | 17,6                  | 20,5          | 154,43                      |
| 68-C            | 17,6                  | 20,4          | 146,06                      |
| <b>68-médio</b> | <b>17,6</b>           | <b>20,40</b>  | <b>146,06</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 69**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 69-A            | 17,2                  | 19,3          | 157,12                      |
| 69-B            | 17,2                  | 19,1          | 136,77                      |
| 69-C            | 17,2                  | 19,2          | 146,72                      |
| <b>69-médio</b> | <b>17,2</b>           | <b>19,20</b>  | <b>146,72</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 70**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 70-A            | 17,2                  | 19,3          | 157,12                      |
| 70-B            | 17,2                  | 19,4          | 168,01                      |
| 70-C            | 17,2                  | 19,3          | 157,12                      |
| <b>70-médio</b> | <b>17,2</b>           | <b>19,33</b>  | <b>160,33</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 71**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 71-A            | 17,2                  | 19,5          | 173,29                      |
| 71-B            | 17,2                  | 19,6          | 184,99                      |
| 71-C            | 17,2                  | 19,6          | 184,99                      |
| <b>71-médio</b> | <b>17,2</b>           | <b>19,53</b>  | <b>176,74</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 72**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 02

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 72-A            | 17,2                  | 19,7          | 197,31                      |
| 72-B            | 17,2                  | 19,8          | 210,33                      |
| 72-C            | 17,2                  | 19,9          | 224,15                      |
| <b>72-médio</b> | <b>17,2</b>           | <b>19,80</b>  | <b>210,33</b>               |

### B.1.c) Recheio 03 – Anéis de Rashig de alumínio – Porosidade 0,91

#### Experimento de Transferência de Massa 73

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 73-A            | 17,6                  | 19,8          | 46,23                       |
| 73-B            | 17,6                  | 19,5          | 38,73                       |
| 73-C            | 17,6                  | 19,7          | 43,68                       |
| <b>73-médio</b> | <b>17,6</b>           | <b>19,67</b>  | <b>42,92</b>                |

#### Experimento de Transferência de Massa 74

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 74-A            | 17,6                  | 20,0          | 51,50                       |
| 74-B            | 17,6                  | 20,0          | 51,50                       |
| 74-C            | 17,6                  | 20,0          | 51,50                       |
| <b>74-médio</b> | <b>17,6</b>           | <b>20,00</b>  | <b>51,50</b>                |

#### Experimento de Transferência de Massa 75

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 75-A            | 17,6                  | 20,4          | 62,79                       |
| 75-B            | 17,6                  | 20,5          | 65,78                       |
| 75-C            | 17,6                  | 20,6          | 68,85                       |
| <b>75-médio</b> | <b>17,6</b>           | <b>20,50</b>  | <b>65,78</b>                |

#### Experimento de Transferência de Massa 76

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 76-A            | 17,6                  | 20,7          | 71,99                       |
| 76-B            | 17,6                  | 20,8          | 75,23                       |
| 76-C            | 17,6                  | 20,9          | 78,55                       |
| <b>76-médio</b> | <b>17,6</b>           | <b>20,80</b>  | <b>75,23</b>                |

#### Experimento de Transferência de Massa 77

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 77-A            | 17,1                  | 19,3          | 104,89                      |
| 77-B            | 17,1                  | 19,2          | 98,48                       |
| 77-C            | 17,1                  | 19,2          | 98,48                       |
| <b>77-médio</b> | <b>17,1</b>           | <b>19,23</b>  | <b>100,38</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 78**

G = 4,5 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 78-A            | 17,1                | 19,4          | 111,55                      |
| 78-B            | 17,1                | 19,5          | 118,47                      |
| 78-C            | 17,1                | 19,4          | 111,55                      |
| <b>78-médio</b> | <b>17,1</b>         | <b>19,43</b>  | <b>113,60</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 79**

G = 4,5 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 79-A            | 17,1                | 19,7          | 133,19                      |
| 79-B            | 17,1                | 19,6          | 125,67                      |
| 79-C            | 17,1                | 19,7          | 133,19                      |
| <b>79-médio</b> | <b>17,1</b>         | <b>19,66</b>  | <b>130,14</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 80**

G = 4,5 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 80-A            | 17,1                | 19,8          | 141,04                      |
| 80-B            | 17,1                | 19,8          | 141,04                      |
| 80-C            | 17,1                | 19,9          | 149,26                      |
| <b>80-médio</b> | <b>17,1</b>         | <b>19,83</b>  | <b>143,47</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 81**

G = 3,0 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 81-A            | 16,5                | 17,6          | 84,50                       |
| 81-B            | 16,5                | 17,6          | 84,50                       |
| 81-C            | 16,5                | 17,5          | 73,16                       |
| <b>81-médio</b> | <b>16,5</b>         | <b>17,56</b>  | <b>79,82</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 82**

G = 3,0 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 82-A            | 16,5                | 17,8          | 111,55                      |
| 82-B            | 16,5                | 17,7          | 97,18                       |
| 82-C            | 16,5                | 17,7          | 97,18                       |
| <b>82-médio</b> | <b>16,5</b>         | <b>17,73</b>  | <b>101,30</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 83**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 83-A            | 16,5                | 17,8          | 111,55                      |
| 83-B            | 16,5                | 18,0          | 147,75                      |
| 83-C            | 16,5                | 17,9          | 128,14                      |
| <b>83-médio</b> | <b>16,5</b>         | <b>17,90</b>  | <b>128,14</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 84**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 84-A            | 17,4                | 18,9          | 157,42                      |
| 84-B            | 17,4                | 18,8          | 136,55                      |
| 84-C            | 17,4                | 18,9          | 157,42                      |
| <b>84-médio</b> | <b>17,4</b>         | <b>18,86</b>  | <b>148,58</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 85**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 85-A            | 17,7                | 20,3          | 51,89                       |
| 85-B            | 17,7                | 20,4          | 54,18                       |
| 85-C            | 17,7                | 20,3          | 51,89                       |
| <b>85-médio</b> | <b>17,7</b>         | <b>20,33</b>  | <b>52,58</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 86**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 86-A            | 17,7                | 20,7          | 61,21                       |
| 86-B            | 17,7                | 20,8          | 63,62                       |
| 86-C            | 17,7                | 20,9          | 66,05                       |
| <b>86-médio</b> | <b>17,7</b>         | <b>20,80</b>  | <b>63,62</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 87**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 87-A            | 17,7                | 21,3          | 76,07                       |
| 87-B            | 17,7                | 21,3          | 76,07                       |
| 87-C            | 17,7                | 21,3          | 76,07                       |
| <b>87-médio</b> | <b>17,7</b>         | <b>21,30</b>  | <b>76,07</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 88**

G = 4,5 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 88-A            | 17,7                  | 21,6          | 83,94                       |
| 88-B            | 17,7                  | 21,9          | 92,14                       |
| 88-C            | 17,7                  | 21,7          | 86,64                       |
| <b>88-médio</b> | <b>17,7</b>           | <b>21,73</b>  | <b>87,45</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 89**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 89-A            | 16,8                  | 18,6          | 127,27                      |
| 89-B            | 16,8                  | 18,8          | 146,97                      |
| 89-C            | 16,8                  | 18,7          | 136,91                      |
| <b>89-médio</b> | <b>16,8</b>           | <b>18,70</b>  | <b>136,91</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 90**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 90-A            | 16,7                  | 18,8          | 158,17                      |
| 90-B            | 16,7                  | 18,8          | 158,17                      |
| 90-C            | 16,7                  | 18,9          | 169,25                      |
| <b>90-médio</b> | <b>16,7</b>           | <b>18,83</b>  | <b>161,44</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 91**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 91-A            | 16,7                  | 19,1          | 193,18                      |
| 91-B            | 16,7                  | 18,9          | 169,25                      |
| 91-C            | 16,7                  | 19,0          | 180,91                      |
| <b>91-médio</b> | <b>16,7</b>           | <b>19,00</b>  | <b>180,91</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 92**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 92-A            | 16,7                  | 19,1          | 193,18                      |
| 92-B            | 16,7                  | 19,3          | 219,89                      |
| 92-C            | 16,7                  | 19,3          | 219,89                      |
| <b>92-médio</b> | <b>16,7</b>           | <b>19,23</b>  | <b>210,19</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 93**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 93-A            | 17,6                | 18,8          | 56,42                       |
| 93-B            | 17,6                | 18,9          | 62,46                       |
| 93-C            | 17,6                | 19,0          | 68,85                       |
| <b>93-médio</b> | <b>17,6</b>         | <b>18,90</b>  | <b>62,46</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 94**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| $K_{Ga}$                    | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| mols/(atm.m <sup>3</sup> s) | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 94-A                        | 17,6                | 19,3          | 90,57                       |
| 94-B                        | 17,6                | 19,2          | 82,85                       |
| 94-C                        | 17,6                | 19,1          | 75,63                       |
| <b>94-médio</b>             | <b>17,6</b>         | <b>19,20</b>  | <b>82,85</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 95**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 95-A            | 17,6                | 19,4          | 98,87                       |
| 95-B            | 17,6                | 19,4          | 98,87                       |
| 95-C            | 17,6                | 19,5          | 107,84                      |
| <b>95-médio</b> | <b>17,6</b>         | <b>19,43</b>  | <b>101,48</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 96**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| $K_{Ga}$                    | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| mols/(atm.m <sup>3</sup> s) | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 96-A                        | 17,6                | 19,7          | 128,30                      |
| 96-B                        | 17,6                | 19,6          | 117,60                      |
| 96-C                        | 17,6                | 19,6          | 117,60                      |
| <b>96-médio</b>             | <b>17,6</b>         | <b>19,63</b>  | <b>120,70</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 97**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 97-A            | 17,2                | 19,8          | 115,05                      |
| 97-B            | 17,2                | 19,8          | 115,05                      |
| 97-C            | 17,2                | 19,7          | 109,40                      |
| <b>97-médio</b> | <b>17,2</b>         | <b>19,76</b>  | <b>112,77</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 98**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 98-A            | 17,2                  | 20,1          | 132,83                      |
| 98-B            | 17,2                  | 20,0          | 126,76                      |
| 98-C            | 17,2                  | 19,9          | 120,83                      |
| <b>98-médio</b> | <b>17,2</b>           | <b>20,00</b>  | <b>126,76</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 99**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número          | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento     | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 99-A            | 17,2                  | 20,3          | 145,46                      |
| 99-B            | 17,2                  | 20,2          | 139,06                      |
| 99-C            | 17,2                  | 20,2          | 139,06                      |
| <b>99-médio</b> | <b>17,2</b>           | <b>20,33</b>  | <b>140,97</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 100**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 100-A            | 17,2                  | 20,4          | 152,02                      |
| 100-B            | 17,2                  | 20,5          | 158,77                      |
| 100-C            | 17,2                  | 20,7          | 172,86                      |
| <b>100-médio</b> | <b>17,2</b>           | <b>20,53</b>  | <b>160,83</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 101**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 101-A            | 17,4                  | 18,8          | 104,10                      |
| 101-B            | 17,4                  | 18,9          | 114,37                      |
| 101-C            | 17,4                  | 18,7          | 94,42                       |
| <b>101-médio</b> | <b>17,4</b>           | <b>18,80</b>  | <b>104,10</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 102**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 102-A            | 17,4                  | 19,0          | 125,32                      |
| 102-B            | 17,4                  | 19,1          | 137,05                      |
| 102-C            | 17,4                  | 18,9          | 114,37                      |
| <b>102-médio</b> | <b>17,4</b>           | <b>19,00</b>  | <b>125,32</b>               |



**Experimento de Transferência de Massa 103**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 103-A            | 16,8                | 18,6          | 146,94                      |
| 103-B            | 16,8                | 18,7          | 160,56                      |
| 103-C            | 16,8                | 18,8          | 175,39                      |
| <b>103-médio</b> | <b>16,8</b>         | <b>18,70</b>  | <b>160,56</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 104**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 104-A            | 16,8                | 19,0          | 209,71                      |
| 104-B            | 16,8                | 18,9          | 191,66                      |
| 104-C            | 16,8                | 18,8          | 175,39                      |
| <b>104-médio</b> | <b>16,8</b>         | <b>18,90</b>  | <b>191,66</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 105**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 105-A            | 17,2                | 20,9          | 75,54                       |
| 105-B            | 17,2                | 21,0          | 77,85                       |
| 105-C            | 17,2                | 21,1          | 80,17                       |
| <b>105-médio</b> | <b>17,2</b>         | <b>21,00</b>  | <b>77,85</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 106**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 106-A            | 17,2                | 21,6          | 92,09                       |
| 106-B            | 17,2                | 21,5          | 89,66                       |
| 106-C            | 17,2                | 21,7          | 94,53                       |
| <b>106-médio</b> | <b>17,2</b>         | <b>21,60</b>  | <b>92,09</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 107**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 107-A            | 17,2                | 22,2          | 107,05                      |
| 107-B            | 17,2                | 22,2          | 107,05                      |
| 107-C            | 17,2                | 22,3          | 109,62                      |
| <b>107-médio</b> | <b>17,2</b>         | <b>22,33</b>  | <b>107,82</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 108**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 03

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 108-A            | 17,2                | 22,6          | 117,47                      |
| 108-B            | 17,2                | 22,7          | 120,14                      |
| 108-C            | 17,2                | 22,8          | 122,83                      |
| <b>108-médio</b> | <b>17,2</b>         | <b>22,70</b>  | <b>120,14</b>               |

**B.1.d) Recheio 04 – Wire mesh (latão) – Porosidade 0,95****Experimento de Transferência de Massa 109**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 109-A            | 16,2                | 19,4          | 70,93                       |
| 109-B            | 16,2                | 19,6          | 76,21                       |
| 109-C            | 16,2                | 19,6          | 76,21                       |
| <b>109-médio</b> | <b>16,2</b>         | <b>19,53</b>  | <b>74,35</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 110**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 110-A            | 16,2                | 20,1          | 90,04                       |
| 110-B            | 16,2                | 20,2          | 92,93                       |
| 110-C            | 16,2                | 20,2          | 92,93                       |
| <b>110-médio</b> | <b>16,2</b>         | <b>20,16</b>  | <b>91,77</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 111**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 111-A            | 16,2                | 20,6          | 104,89                      |
| 111-B            | 16,2                | 20,7          | 108,00                      |
| 111-C            | 16,2                | 20,7          | 108,00                      |
| <b>111-médio</b> | <b>16,2</b>         | <b>20,67</b>  | <b>107,06</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 112**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 112-A            | 16,2                  | 21,1          | 120,92                      |
| 112-B            | 16,2                  | 21,1          | 120,92                      |
| 112-C            | 16,2                  | 21,1          | 120,92                      |
| <b>112-médio</b> | <b>16,2</b>           | <b>21,10</b>  | <b>120,92</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 113**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 113-A            | 16,8                  | 18,3          | 75,96                       |
| 113-B            | 16,8                  | 18,4          | 83,35                       |
| 113-C            | 16,8                  | 18,3          | 75,96                       |
| <b>113-médio</b> | <b>16,8</b>           | <b>18,33</b>  | <b>78,12</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 114**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 114-A            | 16,8                  | 18,4          | 83,35                       |
| 114-B            | 16,8                  | 18,5          | 91,28                       |
| 114-C            | 16,8                  | 18,5          | 91,28                       |
| <b>114-médio</b> | <b>16,8</b>           | <b>18,46</b>  | <b>88,04</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 115**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 115-A            | 16,8                  | 18,7          | 109,06                      |
| 115-B            | 16,8                  | 18,6          | 99,81                       |
| 115-C            | 16,8                  | 18,7          | 109,06                      |
| <b>115-médio</b> | <b>16,8</b>           | <b>18,66</b>  | <b>105,27</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 116**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 116-A            | 16,8                  | 18,9          | 130,22                      |
| 116-B            | 16,8                  | 19,0          | 142,54                      |
| 116-C            | 16,8                  | 18,9          | 130,22                      |
| <b>116-médio</b> | <b>16,8</b>           | <b>18,93</b>  | <b>133,78</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 117**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_G a$                     |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 117-A            | 17,8                | 19,9          | 151,23                      |
| 117-B            | 17,8                | 20,1          | 172,61                      |
| 117-C            | 17,8                | 20,0          | 161,67                      |
| <b>117-médio</b> | <b>17,8</b>         | <b>20,00</b>  | <b>161,67</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 118**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_G a$                     |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 118-A            | 17,8                | 20,1          | 172,61                      |
| 118-B            | 17,8                | 20,2          | 184,10                      |
| 118-C            | 17,8                | 20,2          | 184,10                      |
| <b>118-médio</b> | <b>17,8</b>         | <b>20,17</b>  | <b>180,60</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 119**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_G a$                     |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 119-A            | 17,8                | 20,4          | 208,98                      |
| 119-B            | 17,8                | 20,3          | 196,21                      |
| 119-C            | 17,8                | 20,4          | 208,98                      |
| <b>119-médio</b> | <b>17,8</b>         | <b>20,37</b>  | <b>205,08</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 120**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| $K_G a$                     | Leitura Transmissão |               | $K_G a$                     |
|-----------------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| mols/(atm.m <sup>3</sup> s) | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 120-A                       | 17,8                | 20,4          | 208,98                      |
| 120-B                       | 17,8                | 20,5          | 222,52                      |
| 120-C                       | 17,8                | 20,6          | 236,91                      |
| <b>120-médio</b>            | <b>17,8</b>         | <b>20,50</b>  | <b>222,52</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 121**

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| $K_G a$                     | Leitura Transmissão |               | $K_G a$                     |
|-----------------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| mols/(atm.m <sup>3</sup> s) | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 121-A                       | 16,8                | 19,3          | 56,42                       |
| 121-B                       | 16,8                | 19,2          | 53,59                       |
| 121-C                       | 16,8                | 19,2          | 53,59                       |
| <b>121-médio</b>            | <b>16,8</b>         | <b>19,23</b>  | <b>54,43</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 122**

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leite)       | (saída leite) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 122-A            | 16,8                  | 19,7          | 68,46                       |
| 122-B            | 16,8                  | 19,7          | 68,46                       |
| 122-C            | 16,8                  | 19,6          | 65,34                       |
| <b>122-médio</b> | <b>16,8</b>           | <b>19,67</b>  | <b>67,51</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 123**

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| $K_{Ga}$                    | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| mols/(atm.m <sup>3</sup> s) | (entrada leite)       | (saída leite) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 123-A                       | 16,8                  | 20,0          | 78,33                       |
| 123-B                       | 16,8                  | 20,1          | 81,81                       |
| 123-C                       | 16,8                  | 20,0          | 78,33                       |
| <b>123-médio</b>            | <b>16,8</b>           | <b>20,03</b>  | <b>79,36</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 124**

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| $K_{Ga}$                    | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| mols/(atm.m <sup>3</sup> s) | (entrada leite)       | (saída leite) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 124-A                       | 16,8                  | 20,4          | 92,88                       |
| 124-B                       | 16,8                  | 20,5          | 96,80                       |
| 124-C                       | 16,8                  | 20,4          | 92,88                       |
| <b>124-médio</b>            | <b>16,8</b>           | <b>20,43</b>  | <b>94,04</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 125**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leite)       | (saída leite) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 125-A            | 16,2                  | 19,1          | 140,27                      |
| 125-B            | 16,2                  | 19,0          | 133,84                      |
| 125-C            | 16,2                  | 18,9          | 127,57                      |
| <b>125-médio</b> | <b>16,2</b>           | <b>19,00</b>  | <b>133,84</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 126**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| $K_{Ga}$                    | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| mols/(atm.m <sup>3</sup> s) | (entrada leite)       | (saída leite) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 126-A                       | 16,2                  | 19,2          | 146,87                      |
| 126-B                       | 16,2                  | 19,1          | 140,27                      |
| 126-C                       | 16,2                  | 19,3          | 153,65                      |
| <b>126-médio</b>            | <b>16,2</b>           | <b>19,20</b>  | <b>146,87</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 127**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| $K_{Ga}$                    | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| mols/(atm.m <sup>3</sup> s) | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 127-A                       | 16,2                  | 19,4          | 160,63                      |
| 127-B                       | 16,2                  | 19,5          | 167,81                      |
| 127-C                       | 16,2                  | 19,4          | 160,63                      |
| <b>127-médio</b>            | <b>16,2</b>           | <b>19,43</b>  | <b>162,76</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 128**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 128-A            | 16,2                  | 19,7          | 182,84                      |
| 128-B            | 16,2                  | 19,8          | 190,71                      |
| 128-C            | 16,2                  | 19,8          | 190,71                      |
| <b>128-médio</b> | <b>16,2</b>           | <b>19,77</b>  | <b>188,32</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 129**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 129-A            | 17,1                  | 18,6          | 113,58                      |
| 129-B            | 17,1                  | 18,7          | 124,57                      |
| 129-C            | 17,1                  | 18,8          | 136,33                      |
| <b>129-médio</b> | <b>17,1</b>           | <b>18,70</b>  | <b>124,57</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 130**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 130-A            | 17,1                  | 18,8          | 136,23                      |
| 130-B            | 17,1                  | 19,0          | 162,66                      |
| 130-C            | 17,1                  | 18,9          | 148,97                      |
| <b>130-médio</b> | <b>17,1</b>           | <b>18,90</b>  | <b>148,97</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 131**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 131-A            | 17,1                  | 19,1          | 177,58                      |
| 131-B            | 17,1                  | 19,1          | 177,58                      |
| 131-C            | 17,1                  | 19,2          | 193,96                      |
| <b>131-médio</b> | <b>17,1</b>           | <b>19,13</b>  | <b>182,32</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 132**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 132-A            | 17,1                  | 19,3          | 212,13                      |
| 132-B            | 17,1                  | 19,3          | 212,13                      |
| 132-C            | 17,1                  | 19,3          | 212,13                      |
| <b>132-médio</b> | <b>17,1</b>           | <b>19,30</b>  | <b>212,13</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 133**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 133-A            | 15,8                  | 19,8          | 86,23                       |
| 133-B            | 15,8                  | 19,8          | 86,23                       |
| 133-C            | 15,8                  | 19,8          | 88,71                       |
| <b>133-médio</b> | <b>15,8</b>           | <b>19,83</b>  | <b>86,98</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 134**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 134-A            | 15,8                  | 20,5          | 104,03                      |
| 134-B            | 15,8                  | 20,4          | 101,42                      |
| 134-C            | 15,8                  | 20,5          | 104,03                      |
| <b>134-médio</b> | <b>15,8</b>           | <b>20,47</b>  | <b>103,24</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 135**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 135-A            | 15,8                  | 21,0          | 117,41                      |
| 135-B            | 15,8                  | 21,1          | 120,17                      |
| 135-C            | 15,8                  | 21,0          | 117,41                      |
| <b>135-médio</b> | <b>15,8</b>           | <b>21,03</b>  | <b>118,24</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 136**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 136-A            | 15,8                  | 21,8          | 140,17                      |
| 136-B            | 15,8                  | 21,9          | 143,14                      |
| 136-C            | 15,8                  | 21,7          | 137,23                      |
| <b>136-médio</b> | <b>15,8</b>           | <b>21,80</b>  | <b>140,17</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 137**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 137-A            | 17,5                  | 19,8          | 107,69                      |
| 137-B            | 17,5                  | 19,9          | 114,38                      |
| 137-C            | 17,5                  | 20,0          | 121,34                      |
| <b>137-médio</b> | <b>17,5</b>           | <b>19,90</b>  | <b>114,38</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 138**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 138-A            | 17,5                  | 20,0          | 121,34                      |
| 138-B            | 17,5                  | 20,1          | 128,59                      |
| 138-C            | 17,5                  | 20,1          | 128,59                      |
| <b>138-médio</b> | <b>17,5</b>           | <b>20,06</b>  | <b>125,65</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 139**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 139-A            | 17,5                  | 20,3          | 144,05                      |
| 139-B            | 17,5                  | 20,4          | 152,33                      |
| 139-C            | 17,5                  | 20,3          | 144,05                      |
| <b>139-médio</b> | <b>17,5</b>           | <b>20,33</b>  | <b>146,50</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 140**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 140-A            | 17,5                  | 20,6          | 170,18                      |
| 140-B            | 17,5                  | 20,5          | 161,03                      |
| 140-C            | 17,5                  | 20,4          | 152,33                      |
| <b>140-médio</b> | <b>17,5</b>           | <b>20,50</b>  | <b>161,03</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 141**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Recheio 04

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 141-A            | 15,5                  | 16,4          | 71,32                       |
| 141-B            | 15,5                  | 16,5          | 82,86                       |
| 141-C            | 15,5                  | 16,6          | 95,78                       |
| <b>141-médio</b> | <b>15,5</b>           | <b>16,50</b>  | <b>82,86</b>                |



**Experimento de Transferência de Massa 142**

G = 30 l/min      L = 1,5 l/min      Recheio 04  
 Injetor 03      V = 1500 rpm      Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 142-A            | 15,5                  | 16,6          | 95,78                       |
| 142-B            | 15,5                  | 16,7          | 110,44                      |
| 142-C            | 15,5                  | 16,8          | 127,41                      |
| <b>142-médio</b> | <b>15,5</b>           | <b>16,70</b>  | <b>110,44</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 143**

G = 30 l/min      L = 1,5 l/min      Recheio 04  
 Injetor 03      V = 3000 rpm      Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 143-A            | 15,5                  | 16,8          | 127,41                      |
| 143-B            | 15,5                  | 16,8          | 127,41                      |
| 143-C            | 15,5                  | 16,8          | 127,41                      |
| <b>143-médio</b> | <b>15,5</b>           | <b>16,80</b>  | <b>127,41</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 144**

G = 30 l/min      L = 1,5 l/min      Recheio 04  
 Injetor 03      V = 5000 rpm      Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 144-A            | 15,5                  | 17,0          | 172,35                      |
| 144-B            | 15,5                  | 17,0          | 172,35                      |
| 144-C            | 15,5                  | 16,9          | 147,55                      |
| <b>144-médio</b> | <b>15,5</b>           | <b>16,96</b>  | <b>161,74</b>               |

**B.1.e) Leito Vazio (sem recheio)****Experimento de Transferência de Massa 145**

G = 30 l/min      L = 0,5 l/min      Sem Recheio  
 Injetor 03      V = 500 rpm      Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 145-A            | 17,0                  | 19,1          | 44,04                       |
| 145-B            | 17,0                  | 19,0          | 41,50                       |
| 145-C            | 17,0                  | 19,2          | 46,64                       |
| <b>145-médio</b> | <b>17,0</b>           | <b>19,10</b>  | <b>44,04</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 146**

G = 30 l/min      L = 0,5 l/min      Sem Recheio  
 Injetor 03      V = 1500 rpm      Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 146-A            | 17,0                  | 19,2          | 46,64                       |
| 146-B            | 17,0                  | 19,3          | 49,30                       |
| 146-C            | 17,0                  | 19,3          | 49,30                       |
| <b>146-médio</b> | <b>17,0</b>           | <b>19,26</b>  | <b>48,23</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 147**

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 147-A            | 17,0                | 19,7          | 60,55                       |
| 147-B            | 17,0                | 19,7          | 60,55                       |
| 147-C            | 17,0                | 19,8          | 63,52                       |
| <b>147-médio</b> | <b>17,0</b>         | <b>19,73</b>  | <b>61,43</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 148**

G = 30 l/min

L = 0,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 148-A            | 17,0                | 20,0          | 69,71                       |
| 148-B            | 17,0                | 20,0          | 69,71                       |
| 148-C            | 17,0                | 19,9          | 66,58                       |
| <b>148-médio</b> | <b>17,0</b>         | <b>19,96</b>  | <b>68,45</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 149**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 149-A            | 16,9                | 18,8          | 84,50                       |
| 149-B            | 16,9                | 18,8          | 84,50                       |
| 149-C            | 16,9                | 19,0          | 96,58                       |
| <b>149-médio</b> | <b>16,9</b>         | <b>18,87</b>  | <b>88,64</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 150**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 150-A            | 16,9                | 19,1          | 102,95                      |
| 150-B            | 16,9                | 19,3          | 116,43                      |
| 150-C            | 16,9                | 19,1          | 102,95                      |
| <b>150-médio</b> | <b>16,9</b>         | <b>19,17</b>  | <b>107,57</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 151**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 151-A            | 16,9                | 19,3          | 116,43                      |
| 151-B            | 16,9                | 19,4          | 123,58                      |
| 151-C            | 16,9                | 19,3          | 116,43                      |
| <b>151-médio</b> | <b>16,9</b>         | <b>19,33</b>  | <b>118,54</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 152**

G = 45 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 152-A            | 16,9                  | 19,5          | 131,03                      |
| 152-B            | 16,9                  | 19,6          | 138,82                      |
| 152-C            | 16,9                  | 19,7          | 146,97                      |
| <b>152-médio</b> | <b>16,9</b>           | <b>19,60</b>  | <b>138,82</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 153**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 153-A            | 16,8                  | 20,0          | 64,61                       |
| 153-B            | 16,8                  | 20,1          | 66,85                       |
| 153-C            | 16,8                  | 20,0          | 64,61                       |
| <b>153-médio</b> | <b>16,8</b>           | <b>20,03</b>  | <b>65,28</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 154**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 154-A            | 16,8                  | 21,0          | 87,85                       |
| 154-B            | 16,8                  | 20,9          | 85,44                       |
| 154-C            | 16,8                  | 20,8          | 83,06                       |
| <b>154-médio</b> | <b>16,8</b>           | <b>20,90</b>  | <b>85,44</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 155**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 155-A            | 16,8                  | 21,6          | 102,73                      |
| 155-B            | 16,8                  | 21,5          | 100,20                      |
| 155-C            | 16,8                  | 21,5          | 100,20                      |
| <b>155-médio</b> | <b>16,8</b>           | <b>21,53</b>  | <b>100,96</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 156**

G = 60 l/min

L = 0,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 156-A            | 16,8                  | 22,3          | 121,10                      |
| 156-B            | 16,8                  | 22,4          | 123,82                      |
| 156-C            | 16,8                  | 22,3          | 121,10                      |
| <b>156-médio</b> | <b>16,8</b>           | <b>22,33</b>  | <b>121,91</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 157**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 157-A            | 16,5                | 17,3          | 58,22                       |
| 157-B            | 16,5                | 17,3          | 58,22                       |
| 157-C            | 16,5                | 17,3          | 58,22                       |
| <b>157-médio</b> | <b>16,5</b>         | <b>17,30</b>  | <b>58,22</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 158**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 158-A            | 16,5                | 17,5          | 78,86                       |
| 158-B            | 16,5                | 17,5          | 78,86                       |
| 158-C            | 16,5                | 17,6          | 90,88                       |
| <b>158-médio</b> | <b>16,5</b>         | <b>17,53</b>  | <b>82,33</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 159**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 159-A            | 16,5                | 17,7          | 104,40                      |
| 159-B            | 16,5                | 17,8          | 119,87                      |
| 159-C            | 16,5                | 17,7          | 104,40                      |
| <b>159-médio</b> | <b>16,5</b>         | <b>17,73</b>  | <b>108,81</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 160**

G = 30 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 160-A            | 16,5                | 17,9          | 137,92                      |
| 160-B            | 16,5                | 18,0          | 159,64                      |
| 160-C            | 16,5                | 17,8          | 119,87                      |
| <b>160-médio</b> | <b>16,5</b>         | <b>17,90</b>  | <b>137,92</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 161**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmissão |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)     | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 161-A            | 16,6                | 19,9          | 71,07                       |
| 161-B            | 16,6                | 19,8          | 68,51                       |
| 161-C            | 16,6                | 19,7          | 65,99                       |
| <b>161-médio</b> | <b>16,6</b>         | <b>19,80</b>  | <b>68,51</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 162**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 162-A            | 16,6                  | 20,2          | 78,96                       |
| 162-B            | 16,6                  | 20,3          | 81,65                       |
| 162-C            | 16,6                  | 20,1          | 76,29                       |
| <b>162-médio</b> | <b>16,6</b>           | <b>20,20</b>  | <b>78,96</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 163**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 163-A            | 16,6                  | 20,6          | 89,97                       |
| 163-B            | 16,6                  | 20,8          | 95,71                       |
| 163-C            | 16,6                  | 20,4          | 84,39                       |
| <b>163-médio</b> | <b>16,6</b>           | <b>20,60</b>  | <b>89,97</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 164**

G = 45 l/min

L = 0,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 164-A            | 17,0                  | 21,5          | 101,79                      |
| 164-B            | 17,0                  | 21,4          | 98,84                       |
| 164-C            | 17,0                  | 21,6          | 104,79                      |
| <b>164-médio</b> | <b>17,0</b>           | <b>21,50</b>  | <b>101,79</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 165**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 165-A            | 15,9                  | 18,3          | 111,01                      |
| 165-B            | 15,9                  | 18,3          | 111,01                      |
| 165-C            | 15,9                  | 18,3          | 111,01                      |
| <b>165-médio</b> | <b>15,9</b>           | <b>18,30</b>  | <b>111,01</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 166**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 166-A            | 15,9                  | 18,6          | 129,16                      |
| 166-B            | 15,9                  | 18,5          | 122,96                      |
| 166-C            | 15,9                  | 18,4          | 116,91                      |
| <b>166-médio</b> | <b>15,9</b>           | <b>18,50</b>  | <b>122,96</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 167**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 167-A            | 15,9                  | 18,7          | 135,52                      |
| 167-B            | 15,9                  | 18,8          | 142,05                      |
| 167-C            | 15,9                  | 18,6          | 129,16                      |
| <b>167-médio</b> | <b>15,9</b>           | <b>18,70</b>  | <b>135,52</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 168**

G = 60 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 168-A            | 15,9                  | 19,0          | 155,66                      |
| 168-B            | 15,9                  | 19,0          | 155,66                      |
| 168-C            | 15,9                  | 18,9          | 148,76                      |
| <b>168-médio</b> | <b>15,9</b>           | <b>18,96</b>  | <b>152,87</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 169**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 169-A            | 17,0                  | 18,3          | 93,95                       |
| 169-B            | 17,0                  | 18,4          | 103,71                      |
| 169-C            | 17,0                  | 18,3          | 93,95                       |
| <b>169-médio</b> | <b>17,0</b>           | <b>18,33</b>  | <b>96,82</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 170**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 170-A            | 17,0                  | 18,7          | 136,95                      |
| 170-B            | 17,0                  | 18,6          | 125,12                      |
| 170-C            | 17,0                  | 18,6          | 125,12                      |
| <b>170-médio</b> | <b>17,0</b>           | <b>18,63</b>  | <b>128,58</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 171**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmitância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 171-A            | 17,0                  | 18,8          | 149,68                      |
| 171-B            | 17,0                  | 18,8          | 149,68                      |
| 171-C            | 17,0                  | 18,9          | 163,47                      |
| <b>171-médio</b> | <b>17,0</b>           | <b>18,83</b>  | <b>153,70</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 172**

G = 45 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 172-A            | 17,0                  | 19,1          | 195,02                      |
| 172-B            | 17,0                  | 19,0          | 178,50                      |
| 172-C            | 17,0                  | 19,1          | 195,02                      |
| <b>172-médio</b> | <b>17,0</b>           | <b>19,06</b>  | <b>188,21</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 173**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 173-A            | 16,6                  | 18,1          | 76,63                       |
| 173-B            | 16,6                  | 18,0          | 69,61                       |
| 173-C            | 16,6                  | 18,1          | 76,63                       |
| <b>173-médio</b> | <b>16,6</b>           | <b>18,06</b>  | <b>73,77</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 174**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 174-A            | 16,6                  | 18,3          | 92,15                       |
| 174-B            | 16,6                  | 18,2          | 84,12                       |
| 174-C            | 16,6                  | 18,2          | 84,12                       |
| <b>174-médio</b> | <b>16,6</b>           | <b>18,23</b>  | <b>86,46</b>                |

**Experimento de Transferência de Massa 175**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 175-A            | 16,6                  | 18,5          | 110,18                      |
| 175-B            | 16,6                  | 18,3          | 92,15                       |
| 175-C            | 16,6                  | 18,4          | 100,79                      |
| <b>175-médio</b> | <b>16,6</b>           | <b>18,40</b>  | <b>100,79</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 176**

G = 30 l/min

L = 1,0 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leito)       | (saída leito) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 176-A            | 16,6                  | 18,6          | 120,42                      |
| 176-B            | 16,6                  | 18,6          | 120,42                      |
| 176-C            | 16,6                  | 18,7          | 131,71                      |
| <b>176-médio</b> | <b>16,6</b>           | <b>18,63</b>  | <b>123,69</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 177**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leite)       | (saída leite) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 177-A            | 16,9                  | 18,6          | 121,38                      |
| 177-B            | 16,9                  | 18,6          | 121,38                      |
| 177-C            | 16,9                  | 18,6          | 121,38                      |
| <b>177-médio</b> | <b>16,9</b>           | <b>18,60</b>  | <b>121,38</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 178**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 1500 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leite)       | (saída leite) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 178-A            | 16,9                  | 18,8          | 140,53                      |
| 178-B            | 16,9                  | 18,8          | 140,53                      |
| 178-C            | 16,9                  | 18,8          | 140,53                      |
| <b>178-médio</b> | <b>16,9</b>           | <b>18,80</b>  | <b>140,53</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 179**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 3000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leite)       | (saída leite) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 179-A            | 16,9                  | 18,9          | 150,74                      |
| 179-B            | 16,9                  | 19,1          | 172,62                      |
| 179-C            | 16,9                  | 19,0          | 161,42                      |
| <b>179-médio</b> | <b>16,9</b>           | <b>19,00</b>  | <b>161,42</b>               |

**Experimento de Transferência de Massa 180**

G = 60 l/min

L = 1,5 l/min

Sem Recheio

Injetor 03

V = 5000 rpm

Temperatura = 25°C

| Número           | Leitura Transmítância |               | $K_{Ga}$                    |
|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| Experimento      | (entrada leite)       | (saída leite) | mols/(atm.m <sup>3</sup> s) |
| 180-A            | 16,9                  | 19,2          | 184,39                      |
| 180-B            | 16,9                  | 19,2          | 184,39                      |
| 180-C            | 16,9                  | 19,3          | 196,81                      |
| <b>180-médio</b> | <b>16,9</b>           | <b>19,23</b>  | <b>188,05</b>               |