

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

*AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE UMA  
COLUNA DE DESTILAÇÃO CONTENDO RECHEIO  
ESTRUTURADO KERAPACK.*

**LUIS GERALDO NASCIMENTO LUCIANO DE SENA**

**CAMPINA GRANDE-PARAÍBA**

**OUTUBRO / 1993**

---

**LUIS GERALDO NASCIMENTO LUCIANO DE SENA**

**AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO  
CONTENDO RECHEIO ESTRUTURADO KERAPACK.**

**Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em  
Engenharia Química da Universidade Federal da  
Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção  
do Grau de Mestre.**

---

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OPERAÇÕES E PROCESSOS**

**ORIENTADOR: Prof. MICHEL FRANCOIS FOSSY**

**Campina Grande - Paraíba**



S474a Sena, Luis Geraldo Nascimento Luciano de.  
Avaliação da performance de uma coluna de destilação contendo recheio estruturado kerapack / Luis Geraldo Nascimento Luciano de Sena. - Campina Grande, 1993. 158 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1993.  
"Orientação : Prof. Michel François Fossy".  
Referências.

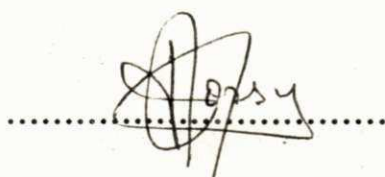
1. Destilação - Coluna. 2. Kerapack - Recheio Estruturado. 3. Avaliações Experimentais. 4. Dissertação - Engenharia Química. I. Fossy, Michel François. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 66.048(043)

**AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO  
CONTENDO RECHEIO ESTRUTURADO.**

**LUIS GERALDO NASCIMENTO LUCIANO DE SENA**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM ....14..... / .....10..... / 1993**



.....

**MICHEL FRANCOIS FOSSY**

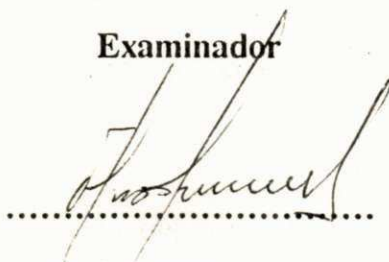
**Orientador**



.....

**ODELSIA LEONOR SÁNCHEZ DE ALSINA**

**Examinador**



.....

**FLORIVAL RODRIGUES DE CARVALHO**

**Examinador**

**Campina Grande, Outubro de 1993**

## AGRADECIMENTOS

A toda minha família pelo incentivo e apoio.

Ao amigo Engenheiro Gerson Porto, por suas valorosas opiniões que muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

A COPENE, por permitir a utilização de suas dependências e equipamentos.

Ao Eng. Luiz Pontes, Chefe de divisão da DIPED II da GETEC, por tornar possível a minha presença na COPENE.

Ao Eng. Murilo Amorim, pelo apoio e ajuda objetivando o êxito do trabalho.

Aos amigos e colegas, Walter Ribeiro Santos e Antônio André Chivanga Barros.

Aos Analistas de P & D, Gilberto Vieira, Eziquiel Correia e Grimaldo Bastos, pela amizade e por suas valiosas participações no desenvolvimento da parte prática, ajudando a tornar concreto este trabalho.

Ao pessoal do DIPED I e DIPED II pelo apoio e amizade.

Ao CEDIN, principalmente nas pessoas de Gismália, Ivone e Tânia, pelos artigos e livros.

Aos Professores e Funcionários do departamento de Mestrado em Engenharia Química da UFPB.

Ao Prof. Kepler Borges, pelo seu dinamismo à frente da coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química.

## RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo a Avaliação da Performance de uma Coluna de Destilação Contendo Recheio Estruturado **KERAPACK** através da determinação da perda de carga e da eficiência, comparando os resultados experimentais com os modelos preditivos existentes para recheios estruturados. Para isto efetuaram-se vários testes experimentais usando o sistema Ciclohexano/N-heptano sob as pressões de 1008, 850, 745, 300, 225 e 176 mbar, tendo a coluna operado sob Refluxo total. Os resultados apresentados pelos testes experimentais ratificam os resultados que são apresentados na literatura, ou seja, os recheios estruturados apresentam uma pequena perda de carga e elevada eficiência.

Ao comparar os resultados experimentais com os modelos preditivos existentes, observou-se grandes desvios que em boa parte pode ser atribuído ao fato destes modelos não terem sido desenvolvidos para o recheio cerâmico **KERAPACK**. Buscou-se então, modificar os modelos preditivos, através de mudanças em alguns parâmetros destas equações na tentativa de se obter uma melhor resposta dessas equações. Foram realizadas modificações utilizando um Programa Elaborado Para o Ajuste das Constantes dos modelos e modificações através do uso do **SIMPLEX** para otimizar as constantes para o recheio em estudo. Como resultado destas modificações, obteve-se uma razoável redução dos desvios, se for feita uma comparação com os modelos originais usados na primeira etapa do trabalho. Os modelos preditivos modificados, passaram a reproduzir com mais precisão os resultados obtidos experimentalmente.

## ABSTRACT

The purpose of this work was evaluate the performance of a distillation column with Kerapak structured packing through the determination of the pressure drop and efficiency, comparing the experimental results with the preexistent predicted models for structured packing. For it, a lot of experimental tests was made employing the sistem of "Ciclohexano/N-heptano" under pressures of 1008, 850, 745, 300, 225 and 176 mbar, having the column operated under total reflux. The results presented by experimental tests confirm the results that are show in the literature, in other words, the structured packings show a little pressure drop and high efficiency.

Comparing the experimental results with the existent predicted models ,we have noted a big deviation that in the major part of cases, can be inputed to the fact of this models haven't been created for Kerapak ceramic packing. So, we Searched for modifying the predicted patterns by the alteration in some parameters of this equations in attempt of obtain the best response of this equacions. Modifications were maden by the utilization of a Program elaborated For the Adjust of model's constants and modifications by the use of SIMPLEX were made to improve the constants of the packing in study. As a result of this modifications, there was good reduction of deviaton if we compare with the original models used in the first stage of this work. The predicted patterns modified possed to reproduce with more precision the results experimentally achieved.

## SIMBOLOGIA

$a, A_s, a_p$  - área da superfície específica do recheio ( $m^2/m^3$ )

$A_e, a_e$  - superfície efetiva do recheio ( $m^2/m^3$ )

$A_t$  - área da seção transversal da coluna ( $m^2$ )

$B$  - base do canal do recheio (m)

$c$  - expoente

$C_1, C_2, C_3$  - constantes características de cada recheio

$d_{eq}$  - diâmetro equivalente do recheio (m)

$D_G$  - coeficiente de difusão da fase vapor ( $m^2/s$ )

$D_L$  - coeficiente de difusão da fase líquida ( $m^2/s$ )

$dp$  - diâmetro da partícula (m)

$f_0$  - fator de fricção para o fluxo de uma partícula

$Fr, Fr_l$  - número de froude do líquido

$F_s$  - fator de fluxo  $(1/s)(kg/m)^{0.5}$

$G$  - densidade de fluxo de massa do vapor ( $kg/m^2 s$ )

$G_M$  - velocidade molar do vapor ( $kg\text{-moles/s } m^2$ )

$g$  - aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$g_c$  - fator de conversão ( $=1$ )

$h$  - altura do canal do recheio (m)

HETP - altura equivalente a um prato teórico (m)



$H_G$  - altura da unidade de transferência da fase vapor (m)

$H_L$  - altura da unidade de transferência da fase líquida (m)

$h_o$  - hold-up do líquido abaixo do loading point ( $m^3/m^3$ )

$H_{OG}$  - altura da unidade de transferência total com base na concentração da fase vapor

$k_G$  - coeficiente de transferência de massa da fase gasosa (m/s)

$k_L$  - coeficiente de transferência de massa da fase líquida (m/s)

$L$  - densidade de fluxo de massa do líquido ( $kg/m^2 s$ )

$l$  - altura do recheio (m)

$L_M$  - velocidade molar do líquido (kg-moles/s  $m^2$ )

$N_{Sc}$  - número de Schmitd

$N_{Sh}$  - número de Sherwood

$N_{Reg}$  - número de Reynolds do vapor

$P$  - média do perímetro baseada na área da seção transversal da coluna ( $m^{-1}$ )

$P_d$  - perímetro avaliado para forma em diamante ou quadrada do canal baseada sobre a área da seção transversal da coluna ( $m^{-1}$ )

$P_t$  - perímetro avaliado para canal na forma triangular, baseada na seção transversal da coluna ( $m^{-1}$ )

$Re_g$  - número de Reynolds do vapor

$U_{ge,eff}$ ,  $U_{gc}$  - velocidade efetiva da fase vapor (m/s)

$U_{le,eff}$  - velocidade efetiva da fase líquida (m/s)

$U_g$ ,  $U_{gs}$  - velocidade superficial da fase vapor (m/s)

U<sub>l</sub> - velocidade superficial da fase líquida (m/s)

S - dimensão do lado do canal (m)

X - fração molar

Z - altura total do recheio (m)

Letras Gregas

$\Delta p$  - queda de pressão (Pa)

$\Delta p_d$  - queda de pressão através do leito seco (Pa)

$\Delta p_{irr}$  - queda de pressão através do leito irrigado (Pa)

$\Gamma$  - fluxo de líquido baseado sobre o perímetro (kg/s m)

$\epsilon$  - fração de vazios do recheio

$\theta$  - ângulo do canal com respeito a horizontal (°)

$\lambda$  - razão de inclinação linha de operação / linha de equilíbrio

$\mu_g$  - viscosidade do vapor (Pa s)

$\mu_l$  - viscosidade da fase líquida (Pa s)

$\rho_g$  - densidade do vapor (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_l$  - densidade do líquido (kg/m<sup>3</sup>)

$\pi = 3,1416\dots$

$\alpha_{AB}, \alpha_{21}$  - volatilidade relativa

$\alpha, \beta$  - constantes do recheio

Subscritos

f - flooding

g - vapor

1 - líquido

D - destilado

B - bottom

1 - componente leve

2 - componente pesado

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 - INTRODUÇÃO .....	3
2.2 - RECHEIOS .....	5
2.3 - ESCOAMENTO DE FLUÍDOS ATRAVÉS DE UMA COLUNA COM RECHEIO .....	14
2.4 - PERDA DE CARGA .....	17
2.5 - EFICIÊNCIA EM RECHEIOS .....	26
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	31
3.1 - EQUIPAMENTO PARA O EXPERIMENTO .....	31
3.1.1 - Coluna .....	31
3.1.2 - Recheio Estudado .....	32
3.1.3 - Equipamentos de Medidas .....	35
3.1.3.1 - Perda de Carga .....	35
3.1.3.2 - Vazão de Líquido .....	35
3.1.3.3 - Pressão da Coluna .....	36
3.1.3.4 - Temperaturas .....	36
3.2 - PRÉ-TESTE .....	36
3.2.1 - Detecção de Vazamentos .....	36
3.2.2 - Aferição do Indicador de Pressão e dos Termômetros .....	37
3.2.3 - Modificações Realizadas .....	38
3.2.3.1 - Bomba de Vácuo .....	38
3.2.3.2 - Bomba de Vácuo Para Coleta de Amostra de Fundo .....	38
3.2.3.3 - Coletor Para Devolução de Amostras .....	39
3.3 - ANÁLISE CROMATOGRÁFICA .....	39
3.4 - ENSAIOS PRELIMINARES .....	43
3.5 - PLANEJAMENTO DAS EXPERIÊNCIAS .....	44

3.6 - ROTEIRO DAS EXPERIÊNCIAS .....	44
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	47
4.1 - RESULTADOS .....	47
4.2 - COMENTÁRIOS DOS RESULTADOS .....	47
4.2.1 - Perda de Carga .....	47
4.2.2 - Eficiência (HETP) .....	48
4.3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM AS CORRELAÇÕES EXISTENTES NA LITERATURA PARA A PERDA DE CARGA .....	55
4.3.1 - Modelo de Bravo .....	55
4.3.2 - Modelo de Stichlmair .....	68
4.4 - COMPARAÇÃO DOS PONTOS EXPERIMENTAIS COM O MODELO PREDITIVO DE BRAVO PARA A DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA .....	79
4.5 - MODIFICAÇÕES DAS EQUAÇÕES DA PERDA DE CARGA PARA SUA UTILIZAÇÃO EM RECHEIOS ESTRUTURADOS KERAPAK .....	88
4.5.1 - Modificações Utilizando Um Programa Elaborado Para o Ajuste das Constantes dos Modelos .....	88
4.5.1.1 - Equação de Bravo .....	88
4.5.1.2 - Equação de Stichlmair .....	100
4.5.2 - Modificações por Métodos Numéricos .....	111
4.5.2.1 - Equação de Bravo .....	111
4.5.2.2 - Equação de Stichlmair .....	123
4.6 - MODIFICAÇÃO DO MODELO PREDITIVO DA EFICIÊNCIA .....	134
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....	143
5.1 - EM RELAÇÃO AO RECHEIO .....	143
5.2 - EM RELAÇÃO AS EQUAÇÕES EXISTENTES NA LITERATURA .....	143
5.3 - EM RELAÇÃO AS EQUAÇÕES DESENVOLVIDAS A PARTIR DAS EQUAÇÕES EXISTENTES NA LITERATURA PARA A PREDIÇÃO DA PERDA DE CARGA .....	144
5.4 - EM RELAÇÃO AS EQUAÇÕES DESENVOLVIDAS A PARTIR DAS EQUAÇÕES EXISTENTES NA LITERATURA PARA A PREDIÇÃO DA EFICIÊNCIA .....	146
5.5 - RESUMO DOS RESULTADOS .....	146

5.6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	151
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	152
APÊNDICE .....	157

Stichalmair et al. com os dados experimentais, para uma mistura de ciclohexano/n-heptano, 1.0 atm, refluxo total e recheio Sulzer BX .....	25
Figura 2.17 - Comparação do HETP calculado Vs. HETP experimental para vários sistemas .....	30
Figura 3.1 - Desenho da coluna de destilação utilizada .....	33
Figura 3.2 - Recheio estruturado Kerapak .....	34
Figura 3.3 - Manômetro em U .....	34
Figura 3.4 - Cromatograma dos produtos de topo .....	41
Figura 3.5 - Cromatograma dos produtos de fundo .....	42
Figura 4.1 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos da equação 2.2, para a pressão de 1008 mbar .....	61
Figura 4.2 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos da equação 2.2, para a pressão de 176 mbar .....	62
Figura 4.3 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos da equação 2.2, para a pressão de 225 mbar .....	62
Figura 4.4 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos da equação 2.2, para a pressão de 300 mbar .....	63
Figura 4.5 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos da equação 2.2, para a pressão de 745 mbar .....	63
Figura 4.6 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos da equação 2.2, para a pressão de 850 mbar .....	64

Figura 4.7 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos calculados pela equação 2.2, para a pressão de 1008 mbar, em relação à velocidade do vapor .....	64
Figura 4.8 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos calculados pela equação 2.2, para a pressão de 176 mbar, em relação a velocidade do vapor .....	65
Figura 4.9 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos calculados pela equação 2.2, para a pressão de 225 mbar, em relação a velocidade do vapor .....	65
Figura 4.10 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos calculados pela equação 2.2, para a pressão de 300 mbar, em relação à velocidade do vapor .....	66
Figura 4.11 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos calculados pela equação 2.2, para a pressão de 745 mbar, em relação à velocidade do vapor .....	66
Figura 4.12 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos calculados pela equação 2.2, para a pressão de 850 mbar, em relação à velocidade do vapor .....	67
Figura 4.13 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer BX, para a pressão de 1008 mbar .....	73
Figura 4.14 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer BX, para a pressão de 176 mbar .....	73
Figura 4.15 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer BX, para	



	a pressão de 225 mbar .....	74
Figura 4.16	- Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer BX, para a pressão de 300 mbar .....	74
Figura 4.17	- Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer BX, para a pressão de 745 mbar .....	75
Figura 4.18	- Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer BX, para a pressão de 850 mbar .....	75
Figura 4.19	- Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 1008 mbar .....	76
Figura 4.20	- Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer BX, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 176 mbar .....	76
Figura 4.21	- Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer BX, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 225 mbar .....	77
Figura 4.22	- Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos	

obtidos com a equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer BX, em relação a velocidade do vapor, para a pressão de 300 mbar ..... 77

Figura 4.23 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer BX, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 745 mbar ..... 78

Figura 4.24 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo a equação 2.12 utilizado as constantes do recheio sulzer BX, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 850 mbar ..... 78

Figura 4.25 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.27, tendo sido utilizada a equação 2.16, em relação ao fator de fluxo, para a pressão 1008 mbar ..... 84

Figura 4.26 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.27, tendo sido utilizada a equação 2.16, em relação ao fator de fluxo, para a pressão de 176 mbar ..... 85

Figura 4.27 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.27, tendo sido utilizada a equação 2.16, em relação ao fator de fluxo, para a pressão de 225 mbar ..... 85

Figura 4.28 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.27, tendo sido utilizada a equação 2.16, em relação ao fator de fluxo, para a

	pressão de 300 mbar .....	86
Figura 4.29 -	Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.27, tendo sido utilizada a equação 2.16, em relação ao fator de fluxo, para a pressão de 745 mbar .....	86
Figura 4.30 -	Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.27, tendo sido utilizada a equação 2.16, em relação ao fator de fluxo, para a pressão de 850 mbar .....	87
Figura 4.31 -	Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos com a equação 4.2, para a pressão de 1008 mbar .....	93
Figura 4.32 -	Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos com a equação 4.2, para a pressão de 176 mbar .....	94
Figura 4.33 -	Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos com a equação 4.2, para a pressão de 225 mbar .....	94
Figura 4.34 -	Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos com a equação 4.2, para a pressão de 300 mbar .....	95
Figura 4.35 -	Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos com a equação 4.2, para a pressão de 745 mbar .....	95
Figura 4.36 -	Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos com a equação 4.2, para a pressão de 850 mbar .....	96
Figura 4.37 -	Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.2, em relação à velocidade	

	do vapor, para a pressão de 1008 mbar .....	96
Figura 4.38 -	Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.2, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 176 mbar .....	97
Figura 4.39 -	Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.2, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 225 mbar .....	97
Figura 4.40 -	Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.2, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 300 mbar .....	98
Figura 4.41 -	Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.2, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 745 mbar .....	98
Figura 4.42 -	Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.2, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 850 mbar .....	99
Figura 4.43 -	Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 2.8, com as constantes da equação 2.9 obtidas empiricamente, para a pressão de 1008 mbar .....	104
Figura 4.44 -	Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 2.8, com as constantes da equação 2.9 obtidas empiricamente, para a pressão de 176 mbar .....	105
Figura 4.45 -	Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 2.8, com as constantes da equação 2.12 obtidas empiricamente, para a pressão de 225 mbar .....	105
Figura 4.46 -	Comparação dos pontos experimentais com os pontos	

obtidos da equação 2.8, com as constantes da equação 2.12 obtidas empiricamente, para a pressão de 300 mbar ..... 106

Figura 4.47 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 2.8, com as constantes da equação 2.12 obtidas empiricamente, para a pressão de 745 mbar ..... 106

Figura 4.48 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 2.8, com as constantes da equação 2.12 obtidas empiricamente, para a pressão de 850 mbar ..... 107

Figura 4.49 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 obtidas empiricamente, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 1008 mbar .....107

Figura 4.50 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 obtidas empiricamente, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 176 mbar .....108

Figura 4.51 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 obtidas empiricamente, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 225 mbar .....108

Figura 4.52 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 obtidas empiricamente, em relação à

	velocidade do vapor, para a pressão de 300 mbar .....	109
Figura 4.53	- Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 obtidas empiricamente, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 745 mbar .....	109
Figura 4.54	- Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 obtidas empiricamente, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 850 mbar .....	110
Figura 4.55	- Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 4.3, para a pressão de 176 mbar .....	116
Figura 4.56	- Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 4.3, para a pressão de 225 mbar .....	117
Figura 4.57	- Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 4.3, para a pressão de 300 mbar .....	117
Figura 4.58	- Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 4.4, para a pressão de 745 mbar .....	118
Figura 4.59	- Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 4.4, para a pressão de 850 mbar .....	118
Figura 4.60	- Comparação dos ponto experimentais com os pontos obtidos da equação 4.4, para a pressão de 1008	

mbar .....	119
Figura 4.61 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.4, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 1008 mbar .....	119
Figura 4.62 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.3, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 176 mbar .....	120
Figura 4.63 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.3, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 225 mbar .....	120
Figura 4.64 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.3, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 300 mbar .....	121
Figura 4.65 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.4, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 745 mbar .....	121
Figura 4.66 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.4, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 850 mbar .....	122
Figura 4.67 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, para a pressão de 176 mbar .....	127
Figura 4.68 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, para a pressão de 225 mbar .....	128
Figura 4.69 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos	

obtidos da equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, para a pressão de 300 mbar ..... 128

Figura 4.70 - Comportamento dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, para a pressão de 1008 mbar ..... 129

Figura 4.71 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, para a pressão de 850 mbar ..... 129

Figura 4.72 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos da equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, para a pressão de 745 mbar ..... 130

Figura 4.73 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, em relação a velocidade do vapor, para a pressão de 1008 mbar .....130

Figura 4.74 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 850 mbar .....131

Figura 4.75 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 745 mbar



.....	131
Figura 4.76 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 300 mbar	.....132
Figura 4.77 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 225 mbar	.....132
Figura 4.78 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.8, tendo as constantes da equação 2.12 sido obtidas pelo simplex, em relação à velocidade do vapor, para a pressão de 176 mbar	.....133
Figura 4.79 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.27, tendo as constantes da equação 4.5 sido obtidas pelo simplex, em relação ao fator de fluxo, para a pressão de 176 mbar	.....139
Figura 4.80 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.27, tendo as constantes da equação 4.5 sido obtidas pelo simplex, em relação ao fator de fluxo, para a pressão de 225 mbar	.....140
Figura 4.81 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.27, tendo as constantes da equação 4.5 sido obtidas pelo simplex, em relação	

ao fator de fluxo, para a pressão de 300 mbar  
.....140

Figura 4.82 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.27, tendo as constantes da equação 4.6 sido obtidas pelo simplex, em relação ao fator de fluxo, para a pressão de 745 mbar  
.....141

Figura 4.83 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 2.27, tendo as constantes da equação 4.6 sido obtidas pelo simplex, em relação ao fator de fluxo, para a pressão de 850 mbar  
.....141

Figura 4.84 - Comportamento dos pontos experimentais e dos pontos obtidos com a equação 4.6 sido obtidas pelo simplex, em relação ao fator de fluxo, para a pressão de 1008 mbar ..... 142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre colunas de prato, com recheio randômico e com recheio estruturado .....	9
Tabela 2.2 - dados de $\alpha$ e $\beta$ para a equação 2.1 .....	19
Tabela 2.3 - Parâmetros de alguns recheios estruturados .....	21
Tabela 4.1 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 1008 mbar .....	49
Tabela 4.2 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 850 mbar .....	49
Tabela 4.3 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 745 mbar .....	51
Tabela 4.4 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 300 mbar .....	52
Tabela 4.5 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 225 mbar .....	52
Tabela 4.6 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 176 mbar .....	53
Tabela 4.7 - Características geométricas do recheio kerapack .....	56
Tabela 4.8 - Comparação dos resultados experimentais com os calculados através da equação 2.2, para a pressão de 1008 mbar .....	58
Tabela 4.9 - Comparação dos resultados experimentais com os calculados através da equação 2.2, para a pressão de 176 mbar .....	58
Tabela 4.10 - Comparação dos resultados experimentais com os calculados através da equação 2.2, para a pressão de 225 mbar .....	59

Tabela 4.11	- Comparação dos resultado experimentais com os calculados através da equação 2.2, para a pressão de 300 mbar .....	59
Tabela 4.12	- Comparação dos resultados experimentais com os calculados através da equação 2.2, para a pressão de 745 mbar .....	60
Tabela 4.13	- Comparação dos resultados experimentais com os calculados através da equação 2.2, para a pressão de 850 mbar .....	60
Tabela 4.14	- Constantes utilizadas pelo recheio kerapak na equação de Stichlmair .....	69
Tabela 4.15	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, para a pressão de 1008 mbar .....	69
Tabela 4.16	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, para a pressão de 176 mbar .....	70
Tabela 4.17	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, para a pressão de 225 mbar .....	70
Tabela 4.18	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, para a pressão de 300 mbar .....	71
Tabela 4.19	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, para a pressão de 745 mbar .....	71
Tabela 4.20	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, para a pressão de 850 mbar .....	72

Tabela 4.21	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos com as equações 2.16 e 2.27, para a pressão de 1008 mbar .....	81
Tabela 4.22	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos com as equações 2.16 e 2.27, para a pressão de 176 mbar .....	81
Tabela 4.23	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos com as equações 2.16 e 2.27, para a pressão de 225 mbar .....	82
Tabela 4.24	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos com as equações 2.16 e 2.27, para a pressão de 300 mbar .....	82
Tabela 4.25	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos com as equações 2.16 e 2.27, para a pressão de 745 mbar .....	83
Tabela 4.26	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos com as equações 2.16 e 2.27, para a pressão de 850 mbar .....	83
Tabela 4.27	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 4.2, para a pressão de 1008 mbar .....	90
Tabela 4.28	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 4.2, para a pressão de 176 mbar .....	90
Tabela 4.29	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 4.2, para a pressão de 225 mbar .....	91
Tabela 4.30	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 4.2, para a pressão de	

	300 mbar .....	91
Tabela 4.31	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 4.2, para a pressão de 745 mbar .....	92
Tabela 4.32	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 4.2, para a pressão de 850 mbar .....	92
Tabela 4.33	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, com as constantes do recheio obtidas empiricamente, para a pressão de 1008 mbar .....	101
Tabela 4.34	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, com as constantes do recheio obtidas empiricamente, para a pressão de 176 mbar .....	101
Tabela 4.35	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, com as constantes do recheio obtidas empiricamente, para a pressão de 225 mbar .....	102
Tabela 4.36	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, com as constantes do recheio obtidas empiricamente, para a pressão de 300 mbar .....	102
Tabela 4.37	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, com as constantes do recheio obtidas empiricamente, para a pressão de 745 mbar .....	103
Tabela 4.38	- Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8, com as constantes	

do recheio obtidas empiricamente, para a pressão de 850 mbar ..... 103

Tabela 4.39 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 4.3, para a pressão de 176 mbar ..... 113

Tabela 4.40 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 4.3, para a pressão 225 mbar .....113

Tabela 4.41 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 4.3, para a pressão de 300 mbar ..... 114

Tabela 4.42 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 4.4, para a pressão de 745 mbar ..... 114

Tabela 4.43 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 4.4, para a pressão de 850 mbar ..... 115

Tabela 4.44 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 4.4, para a pressão de 1008 mbar ..... 116

Tabela 4.45 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 2.8, com as constantes do recheio obtidas pelo simplex, para a pressão de 176 mbar ..... 124

Tabela 4.46 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 2.8, com as constantes do recheio obtidas pelo simplex, para a pressão de 225 mbar ..... 124

Tabela 4.47 - Comparação dos resultados experimentais com os

	resultados da equação 2.8, com as constantes do recheio obtidas pelo simplex, para a pressão de 300 mbar .....	125
Tabela 4.48	- Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 2.8, com as constantes do recheio obtidas pelo simplex, para a pressão de 745 mbar .....	125
Tabela 4.49	- Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 2.8, com as constantes do recheio obtidas pelo simplex, para a pressão de 850 mbar .....	126
Tabela 4.50	- Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 2.8, com as constantes do recheio obtidas pelo simplex, para a pressão de 1008 mbar .....	127
Tabela 4.51	- Comparação dos resultados experimentais com os resultados das equações 4.5 e 2.27, para a pressão de 176 mbar .....	136
Tabela 4.52	- Comparação dos resultados experimentais com os resultados das equações 4.5 e 2.27, para a pressão de 225 mbar .....	136
Tabela 4.53	- Comparação dos resultados experimentais com os resultados das equações 4.5 e 2.27, para a pressão de 300 mbar .....	137
Tabela 4.54	- Comparação dos resultados experimentais com os resultados das equações 4.6 e 2.27, para a pressão de 745 mbar .....	137
Tabela 4.55	- Comparação dos resultados experimentais com os resultados das equações 4.6 e 2.27, para a pressão	



de 850 mbar ..... 138

Tabela 4.56 - Comparação dos resultados experimentais com os  
resultados das equações 4.6 e 2.27, para a pressão  
de 1008 mbar ..... 139

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

No mundo moderno as exigências para a obtenção de produtos com qualidade a custos relativamente baixos são cada vez mais elevadas, exigindo das indústrias, um constante aperfeiçoamento de suas tecnologias para que possam atender a essas exigências.

Com relação as unidades de separação, nas indústrias químicas e petroquímicas procura-se tornar o seu funcionamento mais eficiente através de maiores trocas de matéria e menores perdas de carga tendo como consequência, uma redução do gastos energéticos.

Com o surgimento dos recheios estruturados, o desenvolvimento de estudos e avaliações experimentais, mostram que este dispositivo de contato entre as fases apresenta uma melhor eficiência e uma menor perda de carga que outros dispositivos tais como, aneis de rasching e pratos. No que pese a grande importância dos equipamentos de separação equipados com recheios estruturados, ainda são poucos os dados existentes na literatura. O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de uma coluna de destilação, equipada com recheio estruturado cerâmico KERAPACK, no que diz respeito a perda de carga e eficiência. Infelizmente até o presente momento não se dispõe de dados na literatura sobre o citado recheio, a não ser

os poucos dados que são fornecidos pelo fabricante.

Realizou-se uma ampla revisão bibliográfica em artigos de revistas, livros, bem como em catálogos e montou-se o equipamento para a realização dos testes tendo o objetivo se conseguir os dados experimentais da perda de carga e eficiência, para compará-los, posteriormente, com os resultados obtidos com os modelos teóricos.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 INTRODUÇÃO

A destilação é uma operação unitária de grande importância nas indústrias químicas e petroquímicas e já era bastante praticada bem antes do tempo de Cristo. Normalmente, o objetivo naquela época era aumentar o conteúdo alcoólico do vinho e as separações eram feitas em equipamentos de vaporização / condensação . Nas figuras 2.1 a 2.3 mostram-se alguns dos equipamentos utilizados (Fair, 1983). Para maiores detalhes consulte (Underwood, 1935) e (Forbes, 1948).

Relata-se que a primeira configuração de uma coluna de destilação foi desenvolvida por Cellier-Blumenthal em 1813 e 1818. Para se ter uma boa noção de uma coluna de destilação, elas são identificadas de acordo com os tipos de dispositivos de contato interno. Os pratos produzem um contato em estágio entre o líquido descendente e o vapor que ascende na coluna, seu tipo de contato é usualmente em corrente cruzada, enquanto que nas colunas de recheios existe o contato contínuo e íntimo entre o líquido e o vapor.

Neste capítulo, será feita uma abordagem sobre os assuntos relacionados à perda de carga e à eficiência de uma coluna de

destilação contendo recheios estruturados. Para isso, far-se-á uma revisão, com o intuito de se obter informações a este respeito e também sobre as correlações existentes para o cálculo da perda de carga e da eficiência.

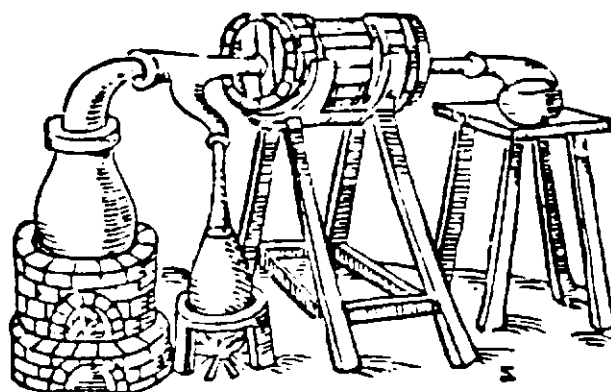
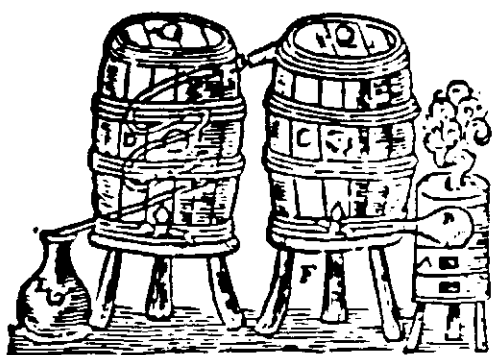


Figura 2.1 - Destilador com provisão para contato de vapor. Figura 2.2 - Destilador com adição de vapor vivo para destilação de gomas e resinas.

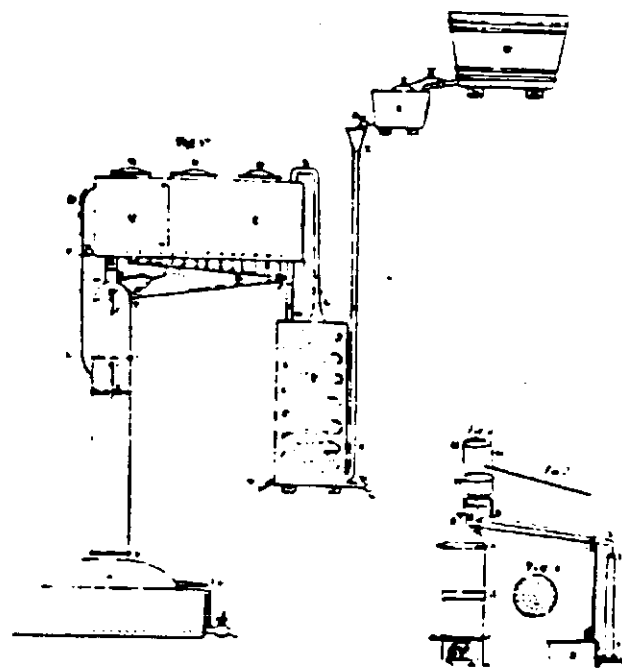


Figura 2.3 - Destilador com pratos perfurados, de Cellier-Blumenthal, 1818.

## 2.2 RECHEIOS

Em 1820, encontram-se as primeiras referências da utilização de bolas de vidro com 25 mm de diâmetro que eram utilizados em alambiques de álcool. (Underwood, 1935) já mencionava que por volta de 1847 já se fazia o uso de pedra, pedra-pome e coque como enchimento de colunas de destilação com a finalidade de produzir uma interação entre o vapor e líquido. O coque foi extensivamente usado devido à sua inércia química e baixo custo, no entanto, seu uso não foi levado adiante devido a ter tendência de formar canais preferenciais e sofrer uma gradual desintegração. Ainda naquele século, passou-se a utilizar elementos esféricos; porém, para reduzir os custos, começaram a utilizar formas não uniformes. No entanto, em decorrência desta não uniformidade, descobriu-se que uma elevada má distribuição do líquido ocorria principalmente para torres de diâmetros maiores. Isto fez com que as torres com recheios só fossem aplicadas nos casos de unidades pilotos ou processos comerciais em pequena escala. A sua maior aplicação nessa época era para serviços corrosivos (Fair, 1983).

Por volta de 1907, surge na Alemanha o anel de rasching, tido como recheio randômico de alta eficiência (Eckert, 1979; Caldas, 1988). Esse recheio é geralmente cerâmico ou metálico e ocasionalmente, plástico (Caldas, 1988). A maioria dos dados da literatura refere-se a esse tipo de recheio (Fair, 1970; Eckert, 1970). Esse recheio apresenta a desvantagem de ter pequena área superficial e como consequência, eficiência reduzida. A sela de Berl é o segundo recheio mais antigo e a ele se sucedeu a sela intalox. Esses recheios tinham a finalidade de tornar o leito o

mais desordenado possível, no entanto, a forma desordenada conduz a formação de caminhos preferenciais devido a presença de grande espaços vazios que é provocado pela heterogeneidade do leito, tornando-o menos eficiente e, em algumas situações, mais denso (Leva, 1953). Esses recheios podem ser encontrados de plásticos, metal e cerâmicos. As figuras 2.4 e 2.5 mostram esses recheios e outros.

Tendo como objetivo a uniformidade do escoamento através da coluna, porém mantendo uma baixa perda de carga e uma alta eficiência, surgiram os recheios estruturados, também conhecidos como recheios de alta eficiência ou de alta porosidade. Os recheios estruturados são todos aqueles que podem ser colocados dentro da coluna de uma forma ordenada ou arrumada. Eles podem ser divididos em dois grandes grupos: Os tradicionais e os de alta eficiência. Os tradicionais são aqueles recheios que primeiro foram usados, tais como, os anéis de rasching maiores que 75 mm e as grades, que podem ser de madeira, metal, plástico ou cerâmico. Esses enchimentos devem ser arrumados no interior da coluna para que apresentem uma boa eficiência com uma baixa perda de carga. Na figura 2.6 mostram-se alguns desses recheios.

Os recheios estruturados de alta eficiência foram desenvolvidos na década de 60, e têm como característica uma perda de carga bastante reduzida e uma elevada eficiência (Caldas, 1988). Eles se constituem de blocos cilíndricos, com diâmetro igual ao diâmetro interno da coluna, podendo ser fabricado em metal, cerâmico, ou ainda, dependendo do diâmetro da coluna, ser fabricado em partes a serem unidas para formar os blocos, (Meier et alii, 1977; Nygren, 1979).

Esses recheios apresentam grandes vazios e devido a isto, apresentam uma excelente regularidade para a passagem das correntes, desta maneira, têm como consequência, uma baixa perda de carga sendo por isso indicados principalmente para trabalhos com vácuo, além disto, podem trabalhar com maiores vazões devido apresentarem grandes porosidades e, em geral, produzem mais estágios por unidade de altura (Meier et alii, 1979; Bravo et alii, 1985; Fair et alii, 1989; Rukovena et alii, 1989).

Alguns exemplos de recheios estruturados podem ser citados tais como: MELLAPAK, SULZER BX, GEMPAK, PANAPAK, FLEXPAC, KERAPAK, GOODLOE, HYPERFIL, NEOKLASS, MELLADUR. Alguns destes recheios e suas características podem ser vistos nas figuras 2.7 a 2.9 (Fair, 1985; Caldas, 1988; Fair et alii, 1989).

A transferência de massa ocorre na interface líquido-gás, por isso, é necessário que o recheio ofereça uma grande área superficial e que haja também um bom contato entre as fases. Os recheios estruturados apresentam estas características (Meier et alii, 1977; Rukovena et alii, 1989). Devido a sua estrutura, os recheios estruturados fazem com que os movimentos das fases sejam em ziguezague, fazendo com que elas se misturem tanto axialmente como radialmente, além disto, cada bloco de recheio é rotado de 90° em relação ao bloco anterior, figura 2.10, o que também garante uma grande mistura das fases (Meier et alii, 1977; Rukovena et alii, 1989). Segundo (Meier et alii, 1977), devido a esta total mistura das correntes, o HETP independe do diâmetro da coluna. Ainda (Meier et alii, 1977), o projeto de uma coluna de destilação ou absorção através de Scale-up dos dados de uma planta piloto que utilize recheios randômicos, é difícil, em



decorrência do líquido no interior da coluna não fluir em todas as seções da coluna, ou seja, o líquido não molha todas as partes da coluna uma, vez que tem a ocorrência de caminhos preferenciais, por esta razão, o recheio randômico tem a má reputação de oferecer baixa eficiência, isto é, valores elevados de HETP. Para colunas com recheios estruturados, isto não ocorre, devido a este dispositivo produzir um menor efeito de canalização. Para qualquer altura do recheio, o valor do fluxo de transferência é máximo quando a coluna opera em condições de carga "loading", pois é quando o recheio se apresenta com sua molhabilidade completa (Chen et alii, 1987).

Nos recheios estruturados, a transferência de massa entre as fases é intensa, considerando a espessura do filme líquido, o pequeno diâmetro das passagens e a turbulência produzida pela estrutura (em forma de ziguezague) (Bravo et alii, 1985; Bühlmann, 1987; Fair et alii, 1989). Segundo (Huber e Meier (1975), a eficiência que os recheios estruturados apresentam em relação a mistura das fases é tal que elementos semelhantes estão sendo utilizados para operações de mistura estática.

Os recheios estruturados, geralmente, apresentam uma alta eficiência de transferência de massa, com baixa perda de carga, quando comparado com outros dispositivos. Pode-se ainda citar outras vantagens tais como:

- Alta capacidade com alta razão de líquido ou alta viscosidade
- Combinação alta capacidade / alta eficiência
- Baixa perda de carga
- Baixo tempo de residência.

No entanto eles têm a desvantagem de ainda apresentarem um alto custo (Bühlmann, 1987; Coker, 1991). Na tabela 2.1 vê-se a melhor performance dos recheios estruturados em relação a outros dispositivos.

**Tabela 2.1. - Comparação entre colunas de prato, com recheio randômico e com recheio estruturado. (Meier et alii, (1977)).**

Exemplo	Coluna de prato	Coluna com recheio randômico Pall Rings 5,08 cm	Coluna com recheio estruturado Koch Sulzer BX
F <sub>r</sub> fator [m <sup>3</sup> s/(kg/m <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> ]	2,44	2,44	2,44
HETP [cm]	63,5	101,6 - 50,8	20,32 - 16,51
$\Delta P/TP$ [m de H <sub>2</sub> O]	3,81 - 10,16	0,762 - 4,064	0,102 - 0,508

Sabe-se, portanto, que a eficiência, a perda de carga e a capacidade são funções da área superficial e porosidade, apresentadas por esses recheios. Resumindo, o recheio deve apresentar algumas qualidades, tais como: alta porosidade e alta área específica, baixa perda de carga, resistência química e mecânica, formato irregular de modo a evitar escoamento preferencial, baixo custo e baixo peso específico.

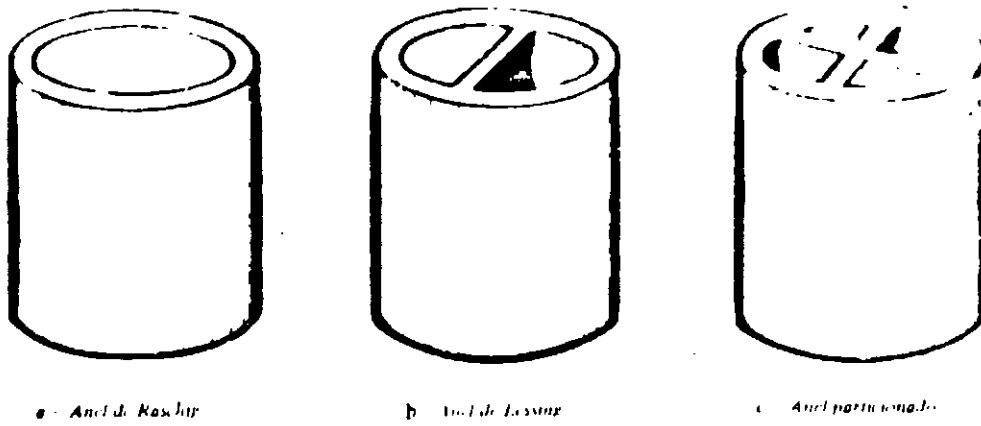


Figura 2.4 - Recheios Randômicos (Caldas, 1988)

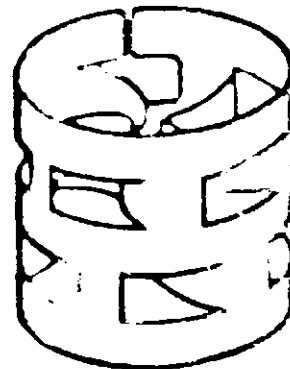
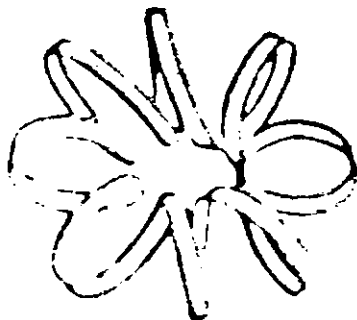
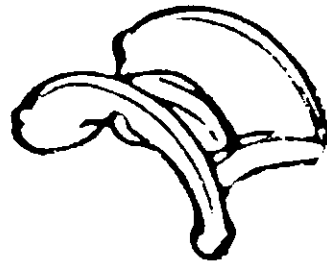
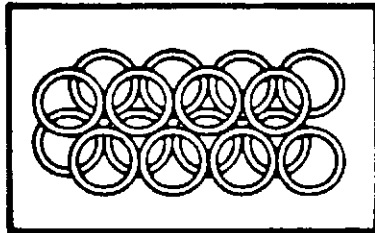
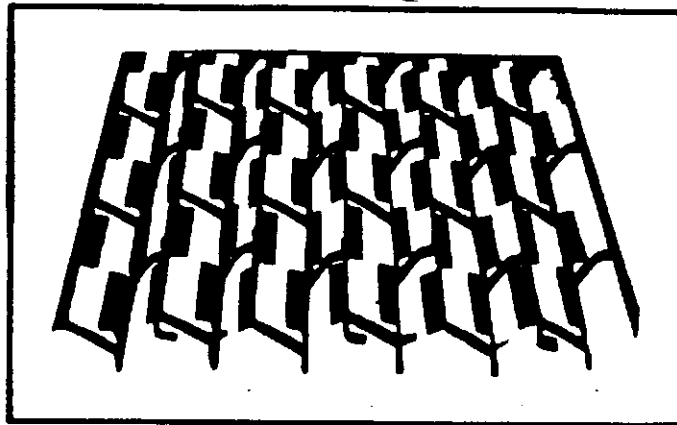


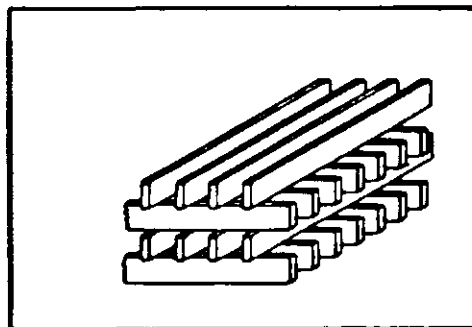
Figura 2.5 - Recheios Randômicos (Caldas, 1988)



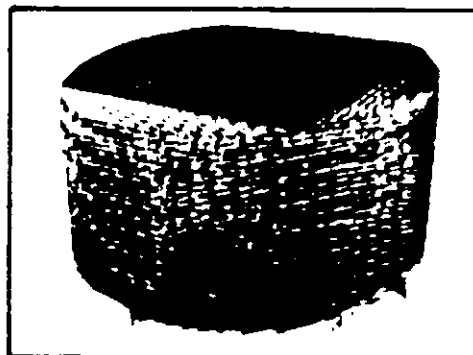
Anel de Reschig



Grade Glitsch  
(aço ou plástico)



Grade de madeira



Grade Glitsch  
(arrumada)

Figura 2.6 - Recheios estruturados tradicionais (Caldas, 1988)

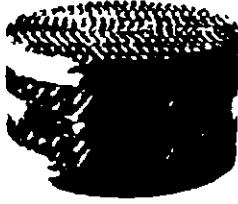

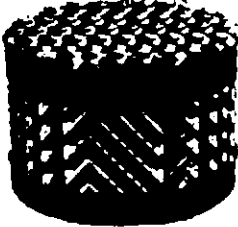


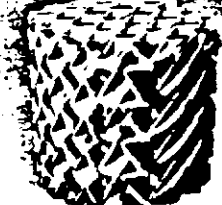

	Packing type	Materials
	BX gauze packing CY gauze packing	Standard: - Stainless steels, such as grades AISI 304L, 316L, etc. - Aluminium, copper-bronze, Monel Hastelloy C4, Ni, Ti etc. Further materials available on request
	BX gauze packing from plastics	Gauze - made from polypropylene/ polyacrylonitrile mixture
	Mellapak 125.Y/125.X Mellapak 250.Y/250.X Mellapak 350.Y/350.X Mellapak 500.Y/500.X Further types on request	Standard: - Stainless steels, such as grades AISI 3105, 304, 316L, 316 Ti, etc. - Carbon steel - Hastelloy C4, Monel, aluminium, copper-bronze, Ni, Ti etc. Further materials available on request
	Mellapak 125.Y Mellapak 250.Y from plastics	Standard PP, PVDF Further materials available on request
	Kerapak	Ceramic based on aluminium silicate
	Melladur	Technical (chemical) porcelain
	DX laboratory packing EX laboratory packing	Standard: 1.4404 (316L)

Figura 2.7 - Vários tipos de recheios estruturados (Sulzer, s.a.)

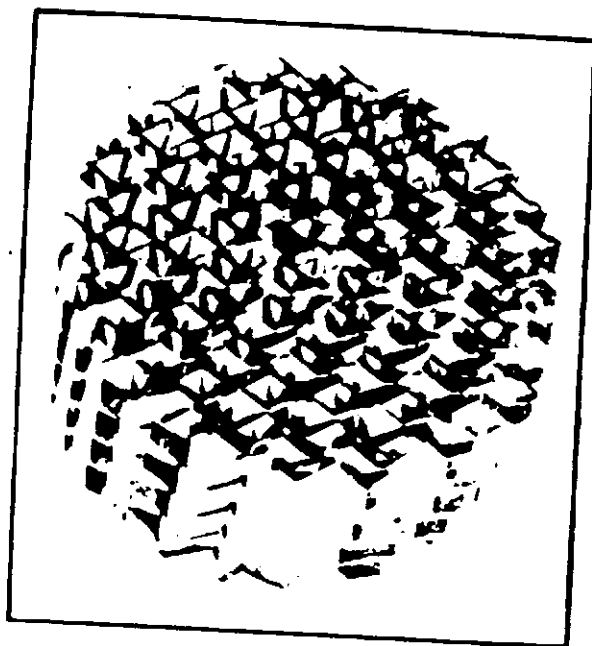
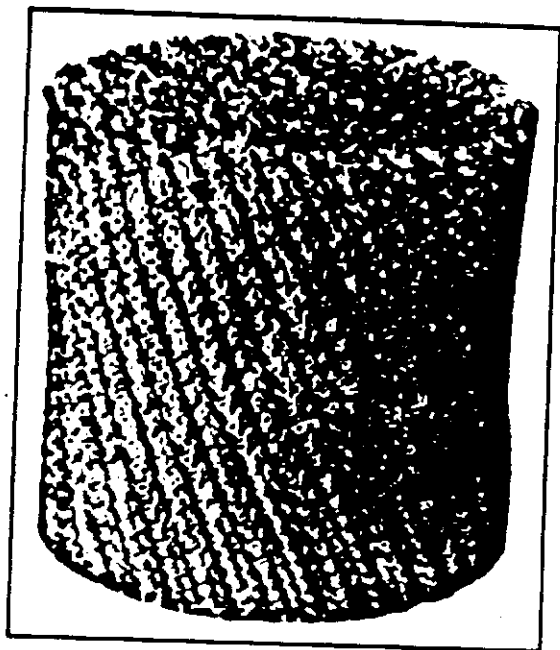


Figura 2.8 - Recheio estruturado Hiperfil (Caldas, 1988) Figura 2.9 - Recheio estruturado Flexipac da Koch (Caldas, 1988)

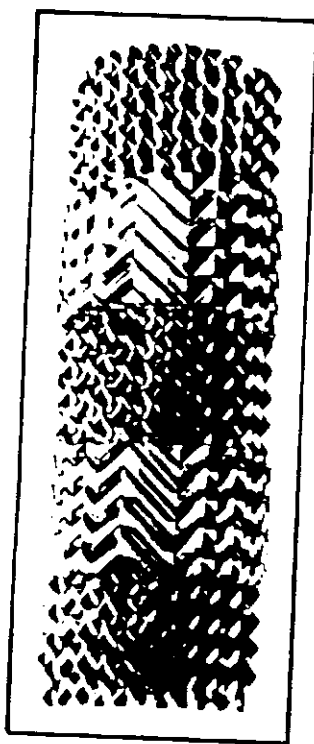


Figura 2.10 - Configuração do recheio estruturado na torre (Caldas, 1988)

### 2.3 Escoamento de Fluidos Através de uma Coluna com Recheio

A queda de pressão entre as extremidades de uma torre de recheio é influenciada tanto pela vazão do vapor bem como, pela vazão de líquido. O comportamento de uma coluna de recheio quando é aumentada a vazão de gás, geralmente representa-se por curvas de perda de carga em função destas vazões, como mostra a figura 2.11.

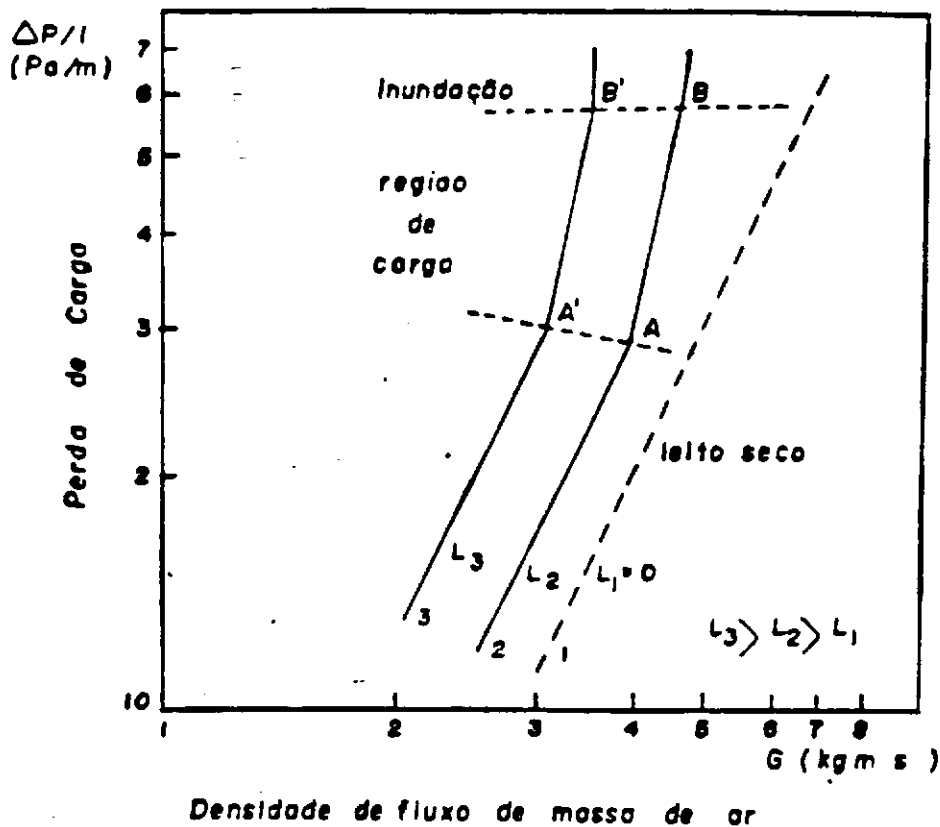


Figura 2.11 - Perda de carga característica em colunas com recheio

Em um escoamento em contracorrente, a perda de carga aumenta com a vazão de gás, para uma determinada vazão de líquido. Nos pontos A,A' conforme as curvas 2 e 3 da figura 2.11, observa-se que começa a haver retenção de líquido no recheio, (Zenz, 1947; Zenz, 1953; White, 1935; Sherwood, 1938; Silvey & Keller, 1966; Treybal, 1980). Chamamos este aumento, de retenção de carga da coluna. Com o aumento da vazão de vapor a partir do ponto A,A', ocasionará uma maior queda de pressão que se reflete na mudança de inclinação da curva.

O aumento da perda de carga é proveniente do bloqueamento da corrente líquida pela corrente gasosa, devido a redução da seção que a massa de gás escoando ocasiona para o líquido, produzindo um aumento da quantidade de líquido retida pelo recheio, que por sua vez cria uma pressão hidrostática que deverá ser vencida pela corrente gasosa. Este ponto, como já foi mencionado anteriormente, é denominado de Ponto de carga "Loading Point".

Fisicamente, no ponto de carga, a velocidade do gás é tal que acarreta o arraste de gotas do líquido para cima, como consequência, o líquido impedido de descer começa a se acumular dentro do recheio. Com o aumento da vazão do vapor, além daquela correspondente ao ponto A,A', verifica-se que a quantidade líquido retido no recheio vai aumentando, tendo como consequência, o aumento da perda de carga. A partir do ponto A,A', o líquido já preenche uma grande parte dos espaços vazios e o gás começa a borbulhar na camada de líquido formada. Chega-se, nesta situação, a uma vazão correspondente ao ponto B,B', onde se diz que a coluna opera em condições de fase líquida contínua (Zenz, 1953; Bröz & Kollar, 1968). A partir deste ponto,



## 2.4 Perda de Carga

Em uma coluna contendo recheios que opera em contra corrente com um sistema líquido-gás, sabe-se que o escoamento do líquido modifica o comportamento do gás, pois muda o volume e a forma dos vazios, além de alterar a superfície de contato (Brownell & Katz, 1947; Kollar & Bröz, 1965; Bröz & Kollar, 1968). O que ocorre é que para um determinado fluxo de massa de gás, a velocidade real do gás, bem como a perda de carga, são maiores do que quando o enchimento está seco (Bröz & Kollar, 1968; Perry & Green, 1984). Além disso, a capacidade de uma coluna de recheio, operando em contracorrente é limitada pela tendência que apresenta em inundar (Sherwood et alii, 1938; Treybal, 1980).

A primeira correlação para o cálculo das condições de inundação em colunas com recheios foi desenvolvida por Sherwood et alii, que se baseou em medidas de laboratórios, usando anéis de rasching como enchimento para o sistema água-ar. A figura 2.12 mostra esta correlação. Dados anteriores de outros investigadores, tanto para os anéis de rasching, como para outros tipos de enchimentos dispostos aleatoriamente, mostram que a correlação de Sherwood se ajusta bem (Backer et alii, 1935; Uchida & Fujita, 1936). Trabalhos posteriores complementaram a correlação de Sherwood (Lobo et alii, 1945; Leva, 1954; Eckert, 1961, 1963; Eckert, 1970; Eckert, 1975; Eckert, 1966; Leva, 1992).

O Grupo Norton melhorou estas correlações através de modificações baseadas em dados obtidos através de milhares de testes feitos em colunas com enchimentos regulares comerciais,

num período de quase 20 anos (Norton, 1977).

(Leva, 1954) apresentou a expressão,

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha 10^{\beta L} G^2 / \rho_g \quad (2.1)$$

onde  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes características dos enchimentos, dados a tabela 2.2, para  $L$  e  $G$  em  $\text{lb}/\text{ft}^2\text{-s}$  e  $\rho_g$  em  $\text{lb}/\text{ft}^3$  (Leva, 1954, 1957; Leva, 1992).

Esta correlação foi desenvolvida para sistemas água-ar, operando abaixo do ponto de inundação e para recheios regulares não ordenados. (Silvey & Keler, 1970) trabalharam com anéis de rasching cerâmicos de 3/4, 1, 1,2 e 3 polegadas, obtiveram resultados bastantes coerentes entre os dados experimentais e a correlação de Leva (Perry & Gren, 1984).

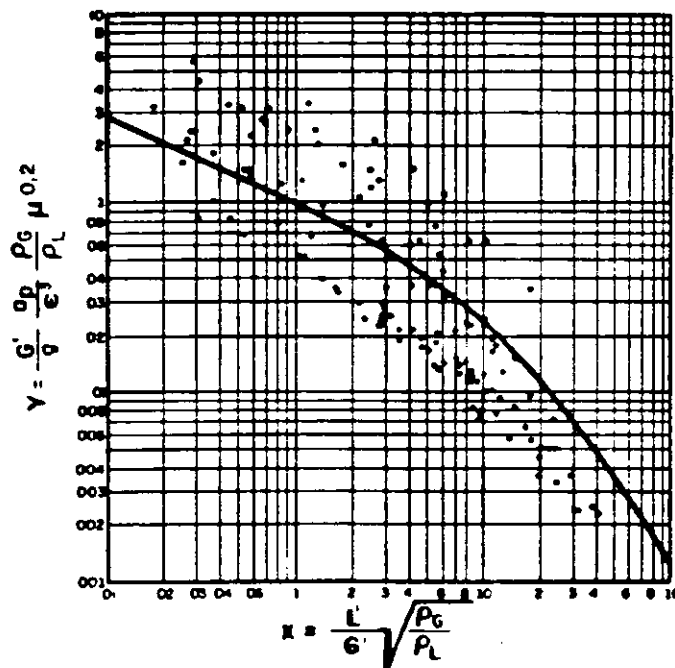


Figura 2 12 - Correlação de Sherwood para anéis de Raschig (Sherwood et alii, 1938)

Tabela 2.2 - Dados de  $\alpha$  e  $\beta$  para a equação 2.1 (Leva, 1957).

Enchimento	Dimensão (in)	$\epsilon$ (%)	$\alpha$	$\beta$
Anéis de Rasching	0,50	59	3,10	0,41
	0,75	72	1,40	0,26
	1,00	69	0,96	0,25
	1,50	76	0,39	0,23
	2,00	82	0,24	0,17
Selas de Berl	0,50	63	1,20	0,21
	1,00	82	0,39	0,17
	1,50	70	0,21	0,13
Selas Intalox	0,50	77	0,82	0,20
	1,00	78	0,31	0,14
	1,50	80	0,14	0,14
	2,00	80	0,08	0,14

As correlações do tipo das de Sherwood et alii, Lobo et alii, Leva e outras como as de Eckert e Norton, são as mais usadas para estimativas de perda de carga em colunas de enchimento não ordenados (Bennet & Myers, 1962; Norton, 1977; Treybal, 1980; Perry & Green, 1984).

Para as colunas de recheios estruturados, que é o objeto do presente trabalho, ainda são poucos os dados disponíveis de perda de carga na literatura.

(Bravo et alii, 1986), apresentaram a equação 2.2 desenvolvida para escoamento através de colunas, contendo recheios estruturados, constituídos de placas metálicas.

$$\Delta P = \left[ 0.171 + \left( \frac{92.7}{Re_g} \right) \right] \left[ \frac{\rho_g U_{ge}^2}{d_{eq} g_c} \right] \left[ \frac{1}{1 - C_3 F_I^{0.5}} \right]^5 \quad (2.2)$$

onde:

$C_3$  é uma constante característica de cada recheio;

$Fr$  é o número de Froude para o líquido e é dado por,

$$Fr = U_L^2 / (d_{eq} g) \quad (2.3)$$

O número de Reynolds é dado por,

$$Re_g = d_{eq} U_{ge} \rho_g / \mu_g \quad (2.4)$$

A velocidade efetiva  $U_{ge}$  é dada por,

$$U_{ge} = U_{gs} / (\epsilon \sin\theta) \quad (2.5)$$

(Bravo et alii, 1985) inicialmente propôs ser o diâmetro equivalente  $d_{eq}$ ,

$$d_{eq} = Bh [1 / (B+2S) + 1/2S] \quad (2.6)$$

Posteriormente, (Bravo et alii, 1986) estabeleceu ser o diâmetro equivalente igual ao comprimento dos catetos do triângulo formado pelas placas dobradas, assim,

$$d_{eq} = S \quad (2.7)$$

Na tabela 2.3, tem-se alguns valores de  $C_3$  em função do  $d_{eq}$  e  $\theta$  para vários tipos de recheios estruturados.

**Tabela 2.3 - Parâmetros de alguns recheios estruturados, Bravo et alii (1986).**

Recheio	Ângulo $\theta$	Diâmetro equivalente (polegadas)	Constante $C_3$
Flexipac	1	45	0.353
	2	45	0.707
	3	45	1.414
	4	45	2.828
Gempak	1A	45	1.414
	2A	45	0.707
	3A	45	0.530
	4A	45	0.353
Sulzer	BX	60	0.353

A equação de (Bravo et alii, 1986) é válida para condições abaixo da carga e não prediz o ponto de inundação, devido não incluir os efeitos da velocidade do gás sobre a retenção de líquido (holdup). Este modelo foi testado originalmente para o sistema água-ar, apresentando desvios em relação aos dados experimentais de cerca de  $\pm 15\%$ . Nas figuras 2.13 e 2.14, mostram-se o comportamento do modelo em relação aos pontos experimentais.

(Stichlmair et alii, 1989) publicam uma nova correlação para a predição da perda de carga. Esse modelo foi desenvolvido em conjunto pelos grupos de pesquisas da Universidade de Essen e pela Universidade do Texas em Austin. Uma grande coleção de dados de perda de carga e de flooding de recheios randômicos e estruturados, obtidos da literatura, foram utilizados para a validação do modelo (Fair et alii, 1990).

Este modelo utiliza o modelo da partícula para descrever a hidrodinâmica da coluna com recheio. No modelo das partículas o

gás é assumido para um fluxo, ao redor da partícula do recheio, que tem uma dimensão característica e o líquido atua para aumentar esta dimensão pela aderência na superfície da partícula.

A presença do líquido também reduz a fração de vazios do leito de recheios (Stichlmair et alii, 1989). Abaixo, tem-se uma descrição geral do modelo para a predição da perda de carga.

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_d} = \frac{(1-\epsilon[1-h_o/\epsilon(1+20[\Delta P/(Z\rho_L g)]^2)](1-\epsilon)^{-1})^{(2+c)/3}}{(1-h_o/\epsilon(1+20[\Delta P/(Z\rho_L g)]^2))^{4.65}} \quad (2.8)$$

onde:

$$\Delta P_d = 3/4 f_o \left( \frac{1-\epsilon}{\epsilon^{4.65}} \right) \rho_g U_g^2 / d_p \quad (2.9)$$

$$d_p = 6(1-\epsilon) / a_p \quad (2.10)$$

$$h_o = 0.555 Fr_1^{1/3} \quad (2.11)$$

$$f_o = \frac{C_1}{Re_g} + \frac{C_2}{Re_g^{0.5}} + C_3 \quad (2.12)$$

$C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são constantes características de cada recheio.

$$Re_g = d_p U_g \rho_g / \mu_g \quad (2.13)$$

$$c = \frac{\left[ \frac{C_1}{Re_g} - \frac{C_2}{2Re_g^{1/2}} \right]}{f_o} \quad (2.14)$$

Para o cálculo da perda de carga, que representa a condição de flooding, foi proposta a seguinte equação:

$$\left(\frac{\Delta P}{\rho_L g}\right)_f^{-2} - \frac{40\left(\frac{2+c}{3}\right)h_o}{1-\epsilon+h_o\left[1+20\left(\frac{\Delta P}{\rho_L g}\right)_f^2\right]} - \frac{186h_o}{\epsilon-h_o\left[1+20\left(\frac{\Delta P}{\rho_L g}\right)_f^2\right]} = 0 \quad (2.15)$$

A equação de Stichlmair et alii, por ser transcendental, requer uma solução numérica para a sua resolução. Este modelo leva em conta o efeito da velocidade do gás sobre a retenção de líquido e pode ser aplicado para descrever o comportamento da perda de carga na região abaixo do loading, no ponto de loading, e no flooding. Tem-se ainda, que o modelo apresenta um melhor comportamento para recheios randômicos, do que para recheios estruturados que podem apresentar grandes desvios, principalmente quando combinados alta razão de gás e baixa razão de líquido (Stichlmair et alii, 1989; Fair et alii, 1990).

Foram realizados testes de comparação entre os modelos de Bravo et alii e o modelo de Stichlmair et alii, usando o recheio estruturado Gempak 2A em uma coluna de destilação, com o sistema ciclohexano/n-heptano para uma variedade de pressão e razão de gás, Fair et alii (1990). Os resultados estão nas figuras 2.15 e 2.16, para as condições de vácuo e pressão, respectivamente. Foi utilizado o Gempak 2A, devido as constantes de correlação serem avaliadas para ambos os modelos (Fair et alii, 1990).

A concordância entre os modelos mostra-se boa e ambos os modelos são sensíveis as frações de vazios do recheio (Fair et alii, 1990).

Devido a complexidade do escoamento num leito irrigado, é comum encontrar na literatura e nos catálogos de fabricantes, resultados de perda de carga específicas para um dado sistema e

enchimento, onde a perda de carga pode estar correlacionada com a densidade de fluxo de massa, com a velocidade do gás ou com o fator de fluxo.

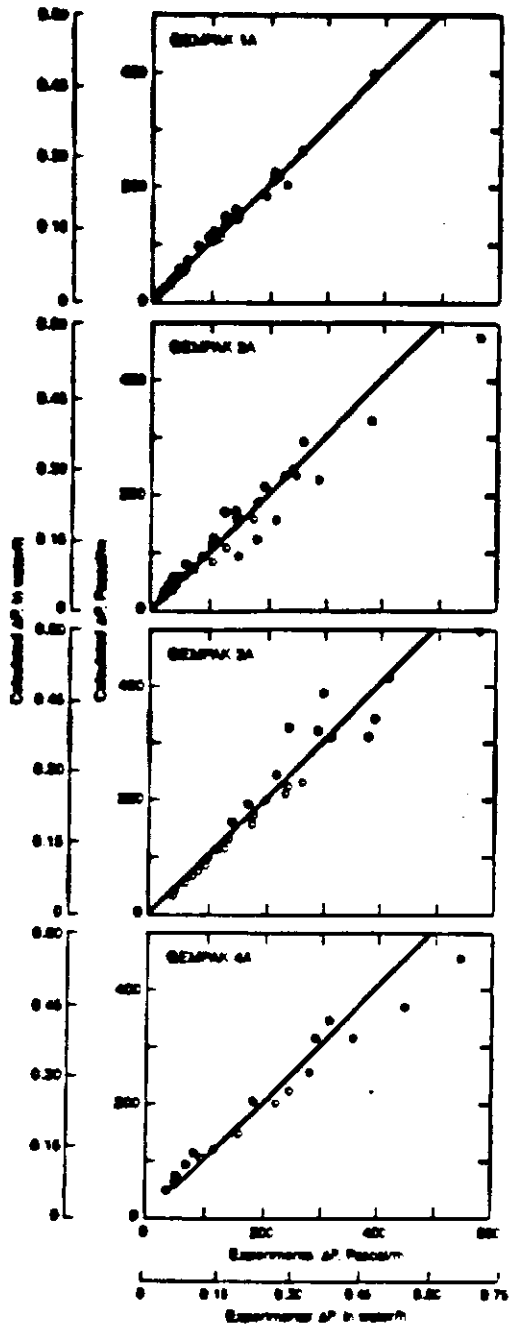


Figura 2.13 - Comparação de perda de pressão calculada com a experimental para recheios General Gravo et alii, 1961

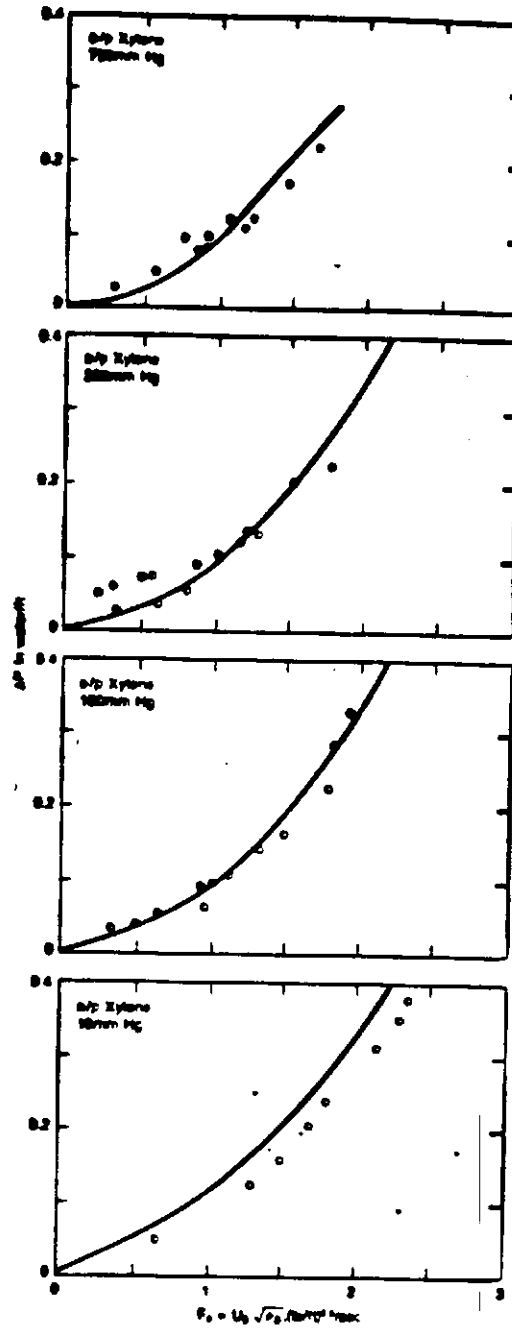


Figura 2.14 - Perda de pressão Calculada vs. apresentada para recheios Salmor de destilado xileno, para colunas de 1.0, 2.5 e 5.0 ft Gravo et alii, 1961



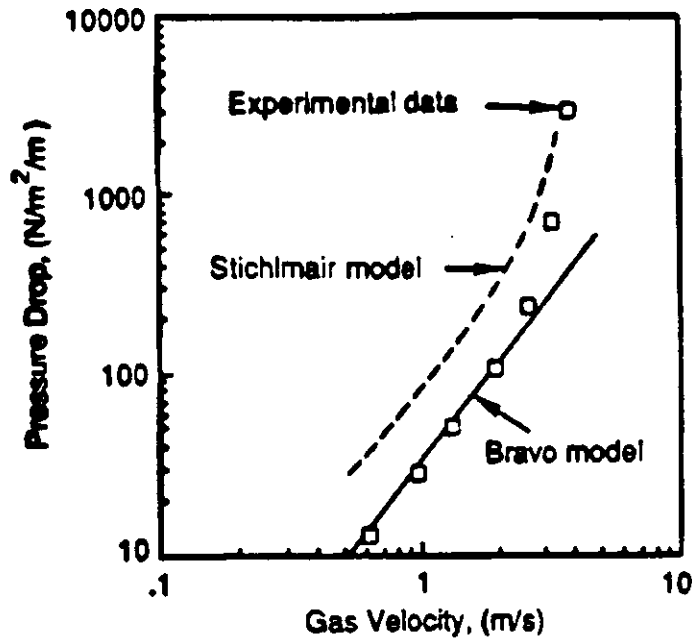


Figura 2.15 - Comparação dos modelos de Bravo et al. e Stichlmair et al. contra os dados experimentais, para uma mistura de ciclohexano/n-heptano, 0.33 atm, refluxo total e recheio Sulzer BX. (Fair et alii, 1990)

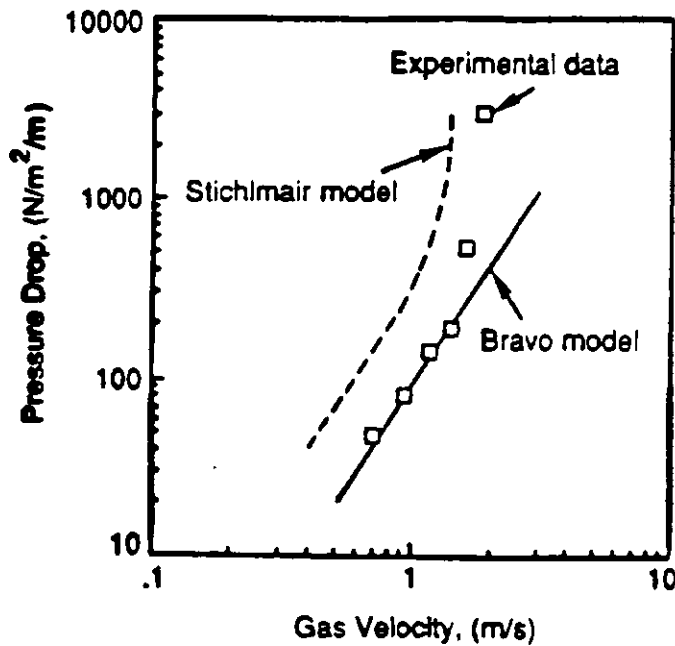


Figura 2.16 - Comparação dos modelos de bravo et al. e Stichlmair et al. Contra os dados experimentais, para uma mistura de ciclohexano/n-heptano, 1.0 atm, refluxo total e recheio Sulzer BX. (Fair et alii, 1990)

## 2.5 EFICIÊNCIA EM RECHEIOS

Tendo como objetivo determinar a eficiência de uma coluna, em 1922 Lewis divulga o conceito de eficiência de estágio. Ainda em 1922 Peters introduz o conceito de altura equivalente a um prato teórico (HETP). Em 1923 Whitman propõe a teoria dos dois filmes e, em 1925, McCabe and Thiele propõem a determinação gráfica dos estágios teóricos.

Nas colunas de pratos, a eficiência depende das propriedades do sistema, das condições de fluxo e da geometria. Devido a pouca possibilidade de variação na geometria do leito de recheio, este último parâmetro assume grande importância para se estimar a eficiência de uma coluna de recheio.

Diversos trabalhos têm sido publicados, Cornel et al (1960), Onda et al (1968), Bravo & Fair (1982), Bolles & Fair (1979, 1982), Leva (1954, 1992), etc., relatando sobre modelos para a predição da eficiência de transferência de massa em colunas com recheios randômicos. Nas colunas com recheios, a transferência de massa é relacionada a taxa de transferência de massa entre o líquido e o vapor em contracorrente.

O primeiro mecanismo para a predição da eficiência de transferência de massa para recheios estruturados foi publicado por (Bravo et al, em 1985). Este modelo foi baseado em uma variedade de dados de testes, obtidos para recheios metálicos Sulzer BX. No modelo, o fluxo de vapor ascendente é visualizado, passando através de uma sucessão de canais de paredes molhadas. O fluxo total passa por estes canais, em ziguezague, causando uma mistura perfeita entre o vapor ascendente e o líquido

descendente. Desta maneira, este modelo forma uma base razoável para a predição da transferência de massa entre o seio do vapor e o líquido fluindo sobre a superfície do metal (Fair et alii, 1990).

Bravo et al encontraram que dados anteriores de (Gilliland and Sherwood, 1934) e (Pigford, 1942), obtidos em uma coluna de parede molhada, para fluxos ascendentes de vapor, os resultados apresentam boa concordância com os resultados provenientes dos experimentos com recheios estruturados. Essa concordância confirma que a superfície da tela metálica é completamente molhada, permitindo que a área interfacial  $a_i$  seja igual a área superficial específica do recheio  $a_p$ . O modelo final de Bravo et al para o coeficiente de transferência de massa da fase gasosa pode ser expressa por:

$$Sh_g = 0.0338 (Re_g)^{0.8} (Sc_g)^{0.333} \quad (2.16)$$

onde,

$$Sh_g (\text{número de Sherwood}) = (k_g d_{eq} / D_g) \quad (2.17)$$

$$Re_g (\text{número de Reynolds}) = (d_{eq} \rho_g / \mu_g) (U_{g,eff} + U_{l,eff}) \quad (2.18)$$

$$Sc_g (\text{número de Schmidt}) = (\mu_g / \rho_g D_g) \quad (2.19)$$

$$U_{g,eff} = U_{gs}/\epsilon \sin\theta \quad (2.20)$$

$$U_{L,eff} = (3\Gamma/2\rho_L) (\rho_L^2 g/3\mu_L \Gamma)^{0.333} \quad (2.21)$$

$U_{g,eff}$  e  $U_{L,eff}$  são respectivamente, a velocidade efetiva do gás e velocidade efetiva do líquido e levam em conta o ângulo de inclinação do canal em relação a horizontal, as frações de vazios,  $\theta$ , da espessura do filme e da geometria do recheio. Tem-se ainda que:

$$\Gamma = L / (PA_t)$$

$A_t$  = área da seção transversal da torre

$P$  = perímetro avaliado da seção transversal da torre.

Veja Bravo et alii (1985).

Para a fase líquida o cálculo do coeficiente de transferência de massa foi baseado no modelo da penetração, com o tempo de exposição baseado no fluxo líquido, através do lado da corrugação, desta maneira,

$$k_1 = 2 \sqrt{\frac{D_1 U_{L,eff}}{\pi S}} \quad (2.22)$$

As alturas das unidades de transferência para as fases individuais são determinadas pela relação individual para destilação:

$$H_g = G/k_g a_e \rho_g \quad (2.23)$$

$$H_l = L/k_l a_e \rho_l \quad (2.24)$$

onde:  $a_e = a_p$

A altura da unidade de transferência total é dada pela relação:

$$H_{og} = H_g + (mG_M/L_M) H_l = H_g + \lambda H_l \quad (2.25)$$

$m$  é a inclinação da linha de equilíbrio e para sistemas binários é dada por:

$$m = \frac{\alpha_{AB}}{[1 + (\alpha_{AB} - 1) X_A]^2} \quad (2.26)$$

onde  $\alpha_{AB}$  é a volatilidade relativa da mistura.

Finalmente, a altura equivalente a um prato teórico (HETP) é calculada com base na altura de transferência total da fase gasosa:

$$HETP = H_{og} [\ln \lambda / (\lambda - 1)] \quad (2.27)$$

Os dados experimentais usados para testar o modelo de Bravo et alii foram provenientes de duas fontes: a do trabalho de (Billet, 1969) na BASF no oeste da Alemanha e o trabalho (Sakata, 1972). Todos os dados experimentais foram obtidos em destilação sob a condição de refluxo total sob pressão atmosférica ou abaixo. O modelo apresentou um desvio médio de 14.6% sendo que,

90% dos pontos apresentaram desvios menores que  $\pm 25\%$  (Bravo et alii, 1985). Menciona-se também que a resistência a transferência de massa oferecida pela fase líquida mostrou-se ser muito baixa no desenvolvimento do modelo. Na figura 2.17 são mostradas as comparações entre o HETP predito pelo modelo de Bravo et alii e o HETP experimental.

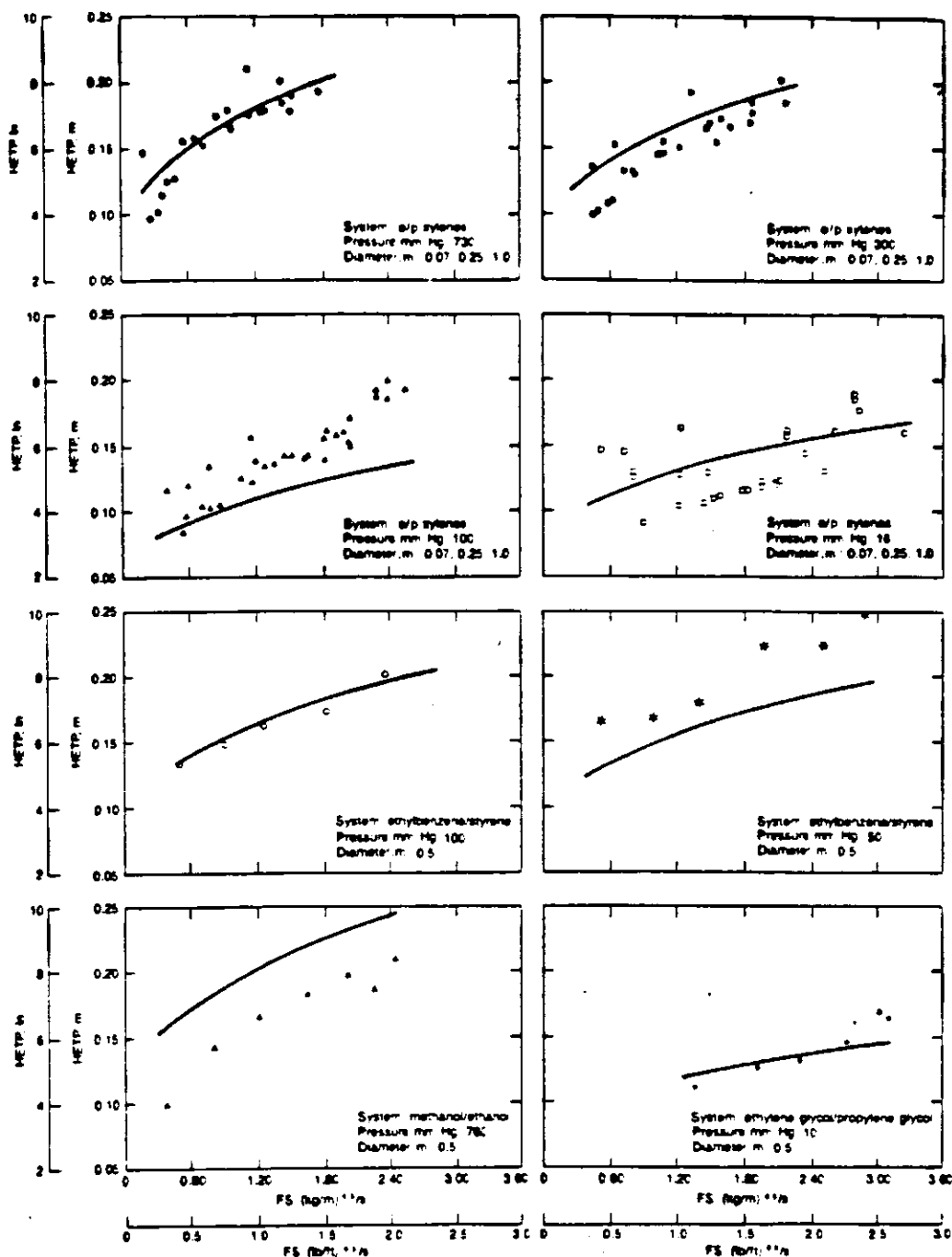


Figura 2.17 - Comparação do HETP calculado vs. o HETP experimental, para vários sistemas (Bravo et alii, 1985)

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Equipamento para o Experimento

##### 3.1.1 Coluna

Foi montada no Laboratório de Avaliação de Processo da GETEC na COPENE, uma coluna de destilação de vidro, com recheio, dotada de encamisamento a vácuo, cujo objetivo é evitar a perda de calor para o ambiente. A coluna tem um diâmetro interno de 43 mm e uma altura total de 3,95 m, sendo dotada de um painel de controle. Na figura 3.1 tem-se o esboço dessa coluna.

Descrevem-se abaixo os principais acessórios da coluna de destilação usada para a realização dos testes.

- 1 - Coluna de vidro espelhado
- 2 - Recheio estruturado
- 3 - Unidade de controle de pressão diferencial (DDI)
- 4 - Condensador de Topo
- 5 - Válvula solenóide de controle da Razão Refluxo/retirada
- 6 - Termômetro de controle e indicação da

temperatura do óleo de aquecimento (carga térmica).

- 7 - Trocador de calor para o produto de topo coletado
- 8 - Termômetro indicador da temperatura de topo
- 9 - Frasco de carga (capacidade 6 litros)
- 10 - Coletor graduado para leitura do volume de produto de topo (volume máximo 100 ml)
- 11 - Balão coletor do produto de topo
- 12 - óleo de aquecimento (Silicone)
- 13 - Saída para a bomba de vácuo
- 14 - Recipiente para o óleo de aquecimento
- 15 - Termômetro indicador da temperatura de fundo

### 3.1.2 Recheio Estudado

O recheio estruturado utilizado nos testes foi o "KERAPACK" da Sulzer. Trata-se de um recheio cerâmico baseado em silicato de alumina, com um diâmetro de aproximadamente 43 mm. Na figura 3.2 tem-se o recheio estruturado Kerapack. Estes recheios estão dispostos na coluna de modo que, entre um bloco de recheio e outro existe uma rotação de 90 graus (Meier et alii,1977; Nygren,1979; Bravo et alii,1985).



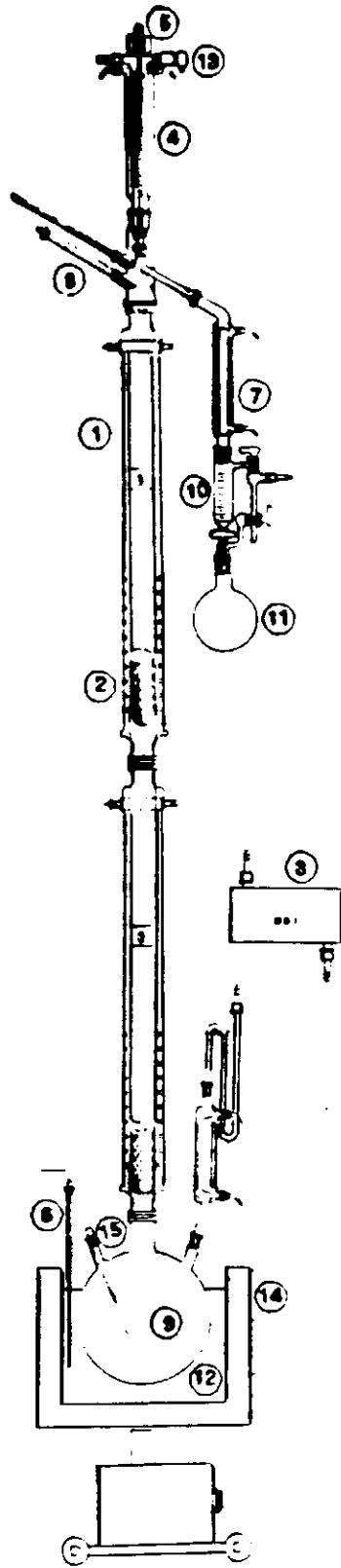


Figura 3.1 - Desenho da coluna de destilação com recheio

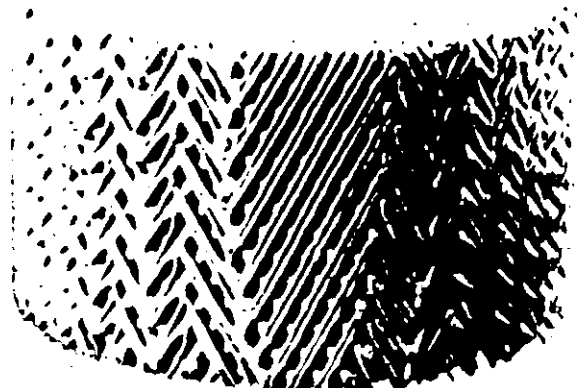


Figura 3.2 - Recheio estruturado Kerapak

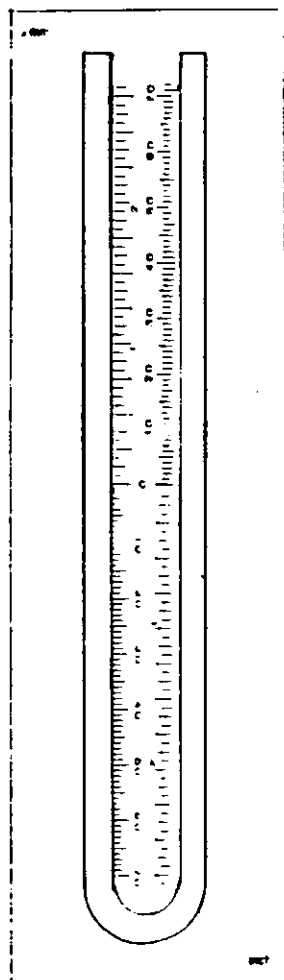


Figura 3.3 - Manômetro de água em U

### **3.1.3 Equipamentos de Medidas**

#### **3.1.3.1 Perda de Carga**

Os valores das perdas de carga eram obtidas pelo DDI, enviando o sinal para o painel onde então tinha o seu valor lido no painel de controle. Posteriormente, aproveitando a mesma linha do DDI, instalou-se um manômetro em U tendo como fluido manométrico a água, figura 3.3. O objetivo da instalação do manômetro foi a de se obter uma leitura mais sensível da perda de carga ao longo da coluna.

#### **3.1.3.2 Vazão de Líquido**

As medidas das vazões de líquido eram feitas mudando-se o sistema de operação de refluxo total para retirada total e ao mesmo tempo, cronometrava-se um determinado tempo. O líquido que é coletado no recipiente volumétrico graduado da própria coluna, tem o seu volume lido. A vazão é obtida dividindo-se o volume lido pelo tempo cronometrado.

Feita a leitura do volume retira-se uma pequena parte para a análise cromatográfica, que é feita imediatamente após a coleta. Como o objetivo trabalhar sempre com o mesmo volume, a amostra coletada é retornada a coluna para se dar prosseguimento aos testes.

### **3.1.3.3 Pressão da Coluna**

A pressão da coluna é lida por um sensor que encontra-se no topo da coluna. Este sensor envia o sinal para o painel de controle, onde o valor da pressão é lida com precisão de uma casa decimal.

### **3.1.3.4 Temperaturas**

Tem-se três pontos de leitura da temperatura que são: a temperatura de topo, fundo e a do óleo de aquecimento. Todos esses pontos tem seus valores lidos diretamente no painel de controle.

## **3.2 Pré-Teste**

### **3.2.1 Detecção de Vazamentos**

Após a montagem da coluna foram realizados testes para a detecção de vazamentos. Os testes consistiam das seguintes etapas:

- 1ª Pressurização da coluna com ar sintético
- 2ª Fecha-se a entrada de ar e com todas os pontos da coluna fechados, observa-se o indicador de pressão. Se o indicador mantiver-se estável, é

sinal de que não há vazamento, caso contrário, parte-se para a etapa seguinte.

- 3ª Procura-se localizar o vazamento usando para isso sabão líquido. Uma vez localizado o vazamento faz-se o conserto e retorna-se a 1ª etapa até que todos os pontos de vazamento sejam eliminados.

### **3.2.2 Aferição do Indicador de Pressão e dos Termômetros**

Tendo como objetivo a certificação da veracidade dos valores apresentados pelos termômetros e pelo indicador de pressão, utilizou-se dois procedimentos. O primeiro procedimento consistiu de ligar o painel com a coluna vazia e comparar o valor da temperatura lida no painel com a de um termômetro já calibrado. Para o indicador de pressão, o valor lido no painel, sob condições atmosféricas, é comparado com o valor lido no barômetro instalado no laboratório.

O segundo procedimento consistiu em colocar para destilar na coluna, um líquido cuja temperatura de ebulição normal fosse conhecida, comparando assim, a temperatura lida no painel com o valor constante na literatura. O líquido utilizado para este teste foi a acetona.

Ambos os procedimentos comprovaram que os equipamentos estavam perfeitamente calibrados uma vez que mostraram uma reprodutibilidade com outros equipamentos e com os dados da literatura.

### **3.2.3 Modificações Realizadas**

#### **3.2.3.1 Bomba de Vácuo**

Durante os pré-testes, com a coluna operando sob a condição de vácuo, tendo como carga a acetona, notou-se que a bomba de vácuo não conseguia estabilizar na pressão desejada. Quando a pressão ultrapassava um pouco o valor desejado a solenóide da bomba abria destabilizando completamente o sistema, uma vez que não era possível manter a pressão desejada, fazendo com que o sistema apresentasse oscilações, fato este que não era de interesse para a realização dos testes experimentais. Diante disso, visando corrigir o problema, trocou-se a bomba original de um estágio, 125 l/min, 220 V 60 Hz, por uma bomba Edwards de 2 estágios, 110/220 V, 6,6/3,3 A, 123 CV, 60 Hz, desativando o sistema de controle de vácuo via solenóide. O controle do vácuo desejado passou a ser feito por uma válvula que foi instalada entre a tubulação e a bomba.

#### **3.2.3.2 Bomba de Vácuo Para Coleta de Amostra de Fundo**

Para a coleta de amostra de fundo, durante a destilação a vácuo, tornou-se necessário a instalação de uma bomba de vácuo. Esta bomba foi conectada ao ponto de retirada de amostra do frasco de carga.

### 3.2.3.3 Coletor Para devolução de Amostras

Como era necessário o retorno do líquido coletado durante os testes ao balão de carga para que fosse possível a realização dos testes seguintes, uma vez que procurou-se realizar todos os testes com o mesmo volume, adaptou-se no lugar do sensor de nível um coletor com válvula tornando possível assim, o retorno da amostra para a coluna.

### 3.3 Análise Cromatográfica

Para a realização das análises visando obter as composições da carga e dos produtos de topo e fundo da coluna de destilação, de uma mistura de **Ciclohexano / N-Heptano**, utilizou-se de um cromatógrafo a gás, modelo **Van Den 5890 A**, acoplado a um integrador-processador modelo **Van Den 3393 A**. As análises eram repetidas para cada amostra retirada e utilizava-se como resposta a média encontrada.

Foi utilizada durante os testes a **Coluna Capilar Metil Silicone tipo "PONA"**, 50 m x 0.25 mm.

As condições de análise no cromatógrafo podem ser assim simplificadas:

Micro-Seringa : Hamilton - Capacidade 5.0 U1 (U1-  
microlitro).

Volume de amostra injetada : 0,25 microlitro.

Detetor : FID - Ionização de Chama.

Gases FID :

- Ar Sintético (ArS) = 400 ml/min
- Hidrogênio (H2) = 30 ml/min
- Nitrogênio (N2) = 20 ml/min

Gás de Arraste :

- Hidrogênio (H2) = 1 ml/min

Split :

- Hidrogênio (H2) = 1/300 ml/min

Purgã Septo :

- Hidrogênio (H2) = 4 - 6 ml/min

Pressão da Cabeça da Coluna : 16.0 PSI

Temperatura inicial: 50 °C

Tempo inicial : 2.0 min

Taxa : 3.0 °C/min

Temperatura Final : 80 °C

Tempo de Análise : 12.0 min

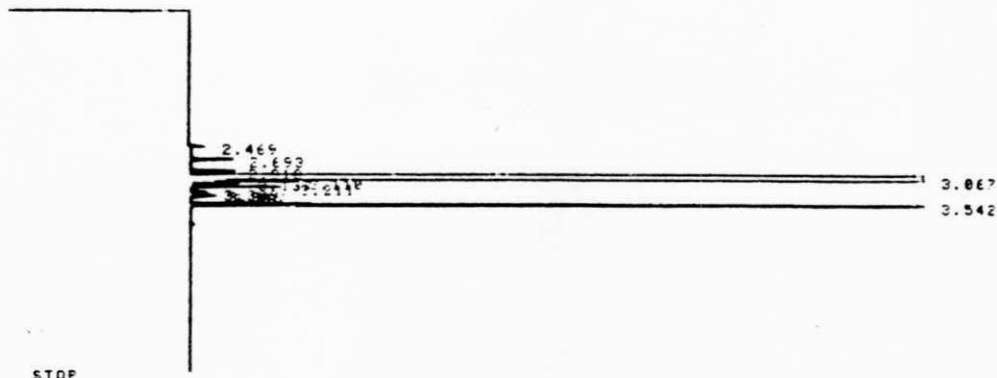
Temperatura do injetor B : 200 °C

Temperatura do detetor A : 300 °C

Nas figuras 3.4 e 3.5 observam-se cromatogramas do topo e do fundo da coluna de destilação.



\*  
 \*TESTE EXPERIMENTAL COLUNA DE DESTILACAO TIPO PECHIEO ESTRUTUFADO BPEAY  
 \*DATA 26/01/93 BPEAY  
 \*AMOSTRA N. 01 SISTEMA CIC6/NC7 BPEAY  
 \*TOPO BPEAY  
 \* RUN 0 3 JAN 1. 1981 07:47:19  
 START



Closing signal file M:SIGNAL .BNC

RUN# 3 JAN 1. 1981 07:47:19

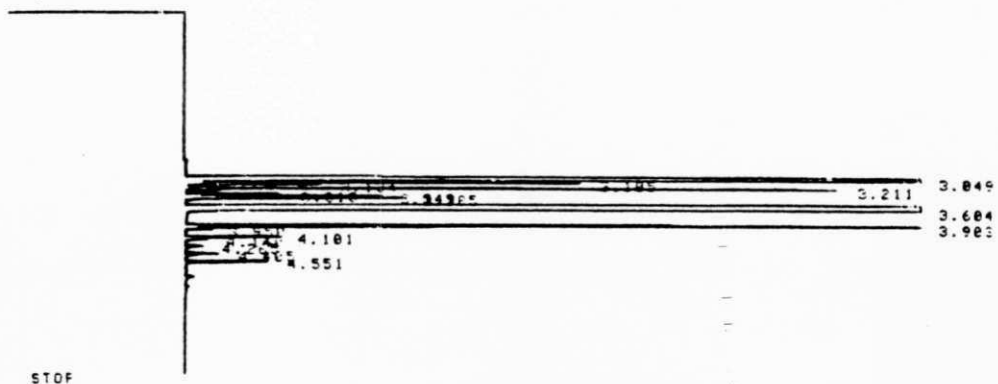
SIGNAL FILE: M:SIGNAL.BNC

RT	AREA	TYPE	WIDTH	AREA%
2.469	488	FE	.014	.00335
2.693	2465	BE	.023	.01690
2.918	1936	FE	.018	.01327
3.067	14484936	EV	.036	99.21139
3.110	4056	VV	.017	.02762
3.137	2072	VV	.017	.01421
3.211	4086	VE	.018	.02001
3.269	754	BV	.020	.00517
3.346	968	VV	.020	.00664
3.382	1244	VE	.020	.00653
3.542	82366	FB	.020	.56472

TOTAL AREA=1.4585E+07  
 MUL FACTOR=1.0000E+00

Figura 3.4 - Cromatograma dos produtos de topo

\*TESTE EXPERIMENTAL COLUNA DE DESTILACAO TIPO RECHEIO ESTRUTURADO BREAK  
 \*DATA 26/01/93 BREAK  
 \*AMOSTRA N. 01 FUNDO SISTEMA CIC6/MC7 BREAK  
 \* RUN 0 4 JAN 1, 1991 07:58:54  
 START



STOP

Closing signal file MSIGNAL .BNC

RUN# 4 JAN 1, 1991 07:58:54

SIGNAL FILE: MSIGNAL.BNC  
 AREA:

RT	AREA	TYPE	WIDTH	AREA%
3.049	5677002	PV	.025	43.04518
3.105	15710	VV	.017	.11912
3.134	5572	VV	.017	.04225
3.211	29342	VE	.019	.22240
3.310	4394	EV	.019	.03332
3.349	9305	VV	.020	.07055
3.385	11075	VE	.022	.08297
3.604	7363744	FE	.041	55.63392
3.903	56292	PV	.024	.42662
3.956	1539	VE	.023	.01166
4.101	5003	PV	.023	.03854
4.140	1290	VE	.023	.00978
4.265	1171	EE	.027	.00888
4.405	2167	FE	.027	.01643
4.551	4695	FE	.025	.03712

TOTAL AREA=1.3189E+07  
 MUL FACTOR=1.0000E+00

Figura 3.5 - Cromatograma dos produtos de fundo

### 3.4 Ensaio Preliminares

Depois de terem sido realizadas todas as modificações no equipamento durante o pré-teste, partiu-se para os ensaios preliminares, já utilizando a mistura **Ciclohexano / N-Heptano** como carga, objetivando saber o comportamento do equipamento, para não se ter maiores surpresas quando da realização dos ensaios experimentais. Durante esses testes não se preocupou com a reposição do líquido retirado durante a coleta, mas sim, em saber como se comportava o equipamento de um modo geral. Outro ponto importante foi a de se ter o conhecimento do comportamento da perda de carga à medida que era aumentada a carga térmica. Notou-se também que ao se atingir uma determinada carga térmica, que dependia da pressão que se estivesse trabalhando, o banho da água de refrigeração, que inicialmente foi estabelecida em 12 °C, não conseguia mais resfriar essa água, ocorrendo então, o aquecimento da mesma. Como consequência, atingia-se um ponto em que o condensador de topo já não conseguia condensar todo o produto que a ele chegava, ocasionando uma perda de produto, pois o produto não condensado era enviado para os coletores, onde era condensado, evitando que a bomba de vácuo fosse atingida, pois se isto ocorresse, a bomba poderia ser danificada. Como solução, foi introduzida uma serpentina no banho e passou-se a circular dentro da serpentina nitrogênio líquido, tornando possível o controle da temperatura da água de refrigeração na faixa pré estabelecida.

### 3.5 Planejamento das Experiências

Tendo como objetivo o estudo do comportamento de uma coluna de destilação contendo recheio estruturado ou de "alta eficiência", torna-se necessário ter o conhecimento da perda de carga que este recheio, **KERAPACK**, produz, bem como a de se fazer uma avaliação em termo de eficiência, ou seja, calculando a altura equivalente a um prato teórico (**HETP**) desta coluna de destilação.

Foi planejado a realização dos testes objetivando medir a perda de carga e a eficiência oferecida pelo recheio durante a destilação de uma mistura binária de ciclohexano/n-heptano. Utilizou-se para tanto um volume da mistura de aproximadamente 3,5 litros. O ciclohexano utilizado foi obtido da **Nitrocarbano** com uma pureza de 99,94998 %. Utilizou-se o n-heptano da **MERK** com uma pureza de 99.46518 %. Procurou-se trabalhar com a composição da mistura de aproximadamente 50 % em peso de cada componente. Eventuais diferenças da ordem de  $\pm 0,5$  eram aceitas.

Os testes foram realizados nas pressões de 1008 mbar , 850 mbar, 745 mbar, 300 mbar, 225 mbar e 176 mbar. Estes testes foram realizados em uma coluna de destilação equipada com 2,0 metros de recheio estruturado **KERAPACK**.

### 3.6 Roteiro das Experiências

Para a realização dos testes foram obedecidas as seguintes etapas:

1- Antes de iniciar a destilação faz-se uma análise da carga para se ter o conhecimento da sua composição, uma vez que a carga inicial deve ser mantida com uma composição de aproximadamente 50% para cada componente.

2- Liga-se o painel de controle

3- Liga-se o banho de água de refrigeração e regula a temperatura da água de refrigeração para cerca de 12 °C.

4- Estabelecer a pressão de operação da coluna. Trabalhando com vácuo, ligar a bomba de vácuo e através da válvula de controle estabelecer a pressão desejada.

5- Fornecer carga térmica à coluna através do aquecimento do óleo de silicone. O silicone aquecido troca calor com a carga dando início à destilação.

6- Após o início da destilação esperar até que seja atingido o equilíbrio.

7- Procede-se a leitura do painel de controle, tomando anotações das:

- perda de carga causada pelo recheio
- temperatura do óleo de aquecimento
- temperatura do produto de topo
- temperatura do produto de fundo

8- Muda-se o seletor de refluxo total para coleta total e mede-se a vazão.

9- Retirar uma pequena parte dos produtos de topo e fundo para análise cromatográfica. Ocorrendo a destilação a vácuo será necessário ligar a bomba de vácuo adaptada ao ponto de retirada de amostra de produto de fundo, para que se possa fazer a coleta da amostra. Sendo a destilação a pressão atmosférica será

necessário somente o uso de uma pêra de sucção.

10- Proceder a análise cromatográfica das amostras

11- Devolver todo o líquido retirado para a coluna, para que se tenha aproximadamente o mesmo volume e concentrações iniciais.

12- Aumentar a carga térmica aumentando a temperatura do óleo de aquecimento.

13- Repete-se do passo 6 em diante até que se tenha alcançado a capacidade máxima da coluna (inundação), neste ponto mesmo com a ajuda da serpentina com nitrogênio líquido, que ajuda a manter a temperatura do banho na faixa pré estabelecida, a troca térmica entre o vapor que chega ao condensador e a água de refrigeração é tão intensa, em função do grande volume de vapor que chega ao topo da coluna, que torna impossível a condensação de todo este vapor. O vapor que não foi condensado no condensador irá se condensar nos coletores, o que torna inviável a sua reutilização, acarretando em perda de produto. Quando isto ocorre encerra-se os testes, começando novos testes com uma outra pressão.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 Resultados

De acordo com o planejamento feito para a realização das experiências, conforme §3.5, foram realizados cerca de 54 ensaios que estão com os resultados listados nas tabelas 4.1 a 4.6. Estas tabelas foram elaboradas para as pressões utilizadas durante os ensaios. Os dados das propriedades físicas foram obtidas do DPPR que estão contidas no ASPEN. Esses valores foram obtidos tomando como base a temperatura do topo da coluna. Os valores da perda de carga experimental apesar de não terem sido lidos com cinco casas decimais, foram assim colocados nas tabelas em virtude da realização de transformações de unidades e também no sentido de padronizar esses resultados com os obtidos com o uso dos modelos predição.

#### 4.2 Comentários dos Resultados

#### 4.2.1 Perda de Carga

Conforme já mencionado na literatura, comprova-se que as perdas de carga dos recheios estruturados realmente são menores quando comparadas com colunas de prato, ou com colunas de recheios randômicos. Na tabela 2.1 poderá ser notado o que foi dito.

Os resultados obtidos durante os ensaios não puderam ser comparados com os dados da literatura, uma vez que não foi encontrado nada a respeito de testes realizados com o recheio cerâmico **KERAPACK**. desta maneira, o trabalho restringiu-se à comparar os resultados experimentais com os resultados obtidos preditivamente com a equação de (Bravo et alii, 1986) e com a equação de (Stichlmair et alii, 1989) e com as equações desenvolvidas a partir dessas equações.

#### 4.2.2 Eficiência (HETP)

Como já mencionado no § 4.2.1, também no caso da eficiência não se dispõe de dados na literatura para que se possa fazer a comparação com os dados obtidos experimentalmente para o recheio estruturado **KERAPACK**. Os dados experimentais serão desta maneira, comparados com o modelo preditivo de (Bravo et alii, 1985) para recheios estruturados e com a equação desenvolvida tomando como base essa equação.



**Tabela 4.1 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 1008 mbar.**

TESTE Nº 01							
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 1008 mbar				TEMP. TOPO : 80.3°C			
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO							
corrida n°	1	2	3	4	5	6	7
fluxo (Kg/m <sup>2</sup> s)	0,23289	0,41332	0,90473	1,09860	1,49775	1,67809	1,93555
$\rho_p$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2,98690	2,98180	2,98080	2,98080	2,98080	2,98030	2,97980
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	718,400	719,600	719,800	719,800	719,800	720,000	720,100
$\mu_2 \times 10^6$ (Pa-s)	8,35020	8,36390	8,36670	8,36670	8,36670	8,36800	8,36940
$\mu_1 \times 10^3$ (Pa-s)	0,23080	0,23100	0,23100	0,23100	0,23100	0,23100	0,23100
$D_2 \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	3,55140	3,55140	3,55140	3,55140	3,55140	3,55140	3,55140
$D_1 \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	6,97070	6,97070	6,97070	6,97070	6,97070	6,97070	6,97070
$P_{sup}(cic6)$ (bar)	1,00289	1,00289	1,00289	1,00289	1,00289	1,00289	1,00289
$P_{sup}(n-c7)$ (bar)	0,57473	0,57473	0,57473	0,57473	0,57473	0,57473	0,57473
$\Delta p/l_{cap}$ (Pa/m)	19,6181	29,4271	58,8542	107,899	176,562	274,653	392,362
HETP <sub>cap</sub> (m)	0,22666	0,23350	0,22090	0,21854	0,21723	0,21498	0,20354

**Tabela 4.2 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 850 mbar.**

TESTE Nº 02							
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 850 mbar				TEMP. TOPO : 75,2°C			
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO							
corrida n°	1	2	3	4	5	6	7
fluxo (Kg/m <sup>2</sup> s)	0,11802	0,17291	0,30918	0,53822	0,76245	0,83301	0,97653
$\rho_p$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2,55250	2,54690	2,54520	2,54220	2,54130	2,54220	2,54260
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	721,400	723,000	723,500	724,400	724,700	724,400	724,300
$\mu_2 \times 10^6$ (Pa-s)	8,20680	8,22460	8,23010	8,23960	8,24240	8,23960	8,23830
$\mu_1 \times 10^3$ (Pa-s)	0,23710	0,23730	0,23740	0,23750	0,23750	0,23750	0,25750
$D_2 \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	4,11040	4,11030	4,11030	4,11030	4,11020	4,11030	4,11030
$D_1 \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	6,65830	6,65830	6,65830	6,65830	6,65830	6,65830	6,65830
$P_{sup}(cic6)$ (bar)	0,85836	0,85836	0,85836	0,85836	0,85836	0,85836	0,85836
$P_{sup}(n-c7)$ (bar)	0,48434	0,48434	0,48434	0,48434	0,48434	0,48434	0,48434
$\Delta p/l_{cap}$ (Pa/m)	9,80904	19,6181	39,2362	49,0452	58,8542	78,4723	88,2814
HETP <sub>cap</sub> (m)	0,32316	0,28376	0,26830	0,24324	0,23777	0,24483	0,24703

continuação da tabela 4.2.

corrida n°	8	9	10	11	12	13	14
fluxo (Kg/m <sup>2</sup> s)	1,06288	1,12940	1,42612	1,62443	1,71391	1,94963	2,09352
$\rho_f$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2,54220	2,54180	2,54180	2,54180	2,54090	2,54090	2,54050
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	724,400	724,500	724,500	724,500	724,800	724,800	724,900
$\mu_x \times 10^6$ (Pa-s)	8,23960	8,24100	8,24100	8,24100	8,24370	8,24370	8,24510
$\mu_l \times 10^3$ (Pa-s)	0,23750	0,23750	0,23750	0,23750	0,23750	0,23750	0,23750
$D_f$ (m <sup>2</sup> /s)	4,11020	4,11020	4,11020	4,11020	4,11020	4,11020	4,11020
$D_l$ (m <sup>2</sup> /s)	6,65830	6,65830	6,65830	6,65830	6,65830	6,65830	6,65830
$P_{vap}(cic6)$ (bar)	0,85836	0,85836	0,85836	0,85836	0,85836	0,85836	0,85836
$P_{vap}(n-c7)$ (bar)	0,48434	0,48434	0,48434	0,48434	0,48434	0,48434	0,48434
$\Delta p/l_{exp}$ (Pa/m)	107,899	156,945	215,799	353,125	500,261	765,105	912,241
HETP <sub>(exp)</sub> (m)	0,24369	0,23883	0,23791	0,23527	0,22371	0,22171	0,21917

continuação da tabela 4.2

corrida n°	15
fluxo (Kg/m <sup>2</sup> s)	2,25184
$\rho_f$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2,53960
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	725,200
$\mu_x \times 10^6$ (Pa-s)	8,24780
$\mu_l \times 10^3$ (Pa-s)	0,23760
$D_f \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	4,11020
$D_l \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	6,65830
$P_{vap}(cic6)$ (bar)	0,85836
$P_{vap}(n-c7)$ (bar)	0,48434
$\Delta p/l_{exp}$ (Pa/m)	1206,51
HETP <sub>(exp)</sub> (m)	0,20842

Tabela 4.3 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 745 mbar.

TESTE Nº 03							
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 745 mbar				TEMP. TOPO : 70.7°C			
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO							
corrida nº	1	2	3	4	5	6	7
fluxo (Kg/m <sup>3</sup> s)	0,19819	0,39422	0,54186	0,74026	0,84275	1,04479	1,41175
$\rho_g$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2,24930	2,25270	2,25010	2,25010	2,24930	2,24890	2,25040
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	729,600	728,500	729,300	729,300	729,600	729,700	729,200
$\mu_g \times 10^6$ (Pa-s)	8,14250	8,13030	8,13980	8,13980	8,14250	8,14390	8,13850
$\mu_l \times 10^3$ (Pa-s)	0,24340	0,24330	0,24340	0,24340	0,24340	0,24340	0,24340
$D_g \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	4,58440	4,58450	4,58440	4,58440	4,58440	4,58440	4,58450
$D_l \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	6,39570	6,39570	6,39570	6,39570	6,39570	6,39570	6,39570
$P_{\text{exp}}(\text{cic6})$ (bar)	0,74489	0,74489	0,74489	0,74489	0,74489	0,74489	0,74489
$P_{\text{exp}}(\text{n-c7})$ (bar)	0,41442	0,41442	0,41442	0,41442	0,41442	0,41442	0,41442
$\Delta p/l_{\text{exp}}$ (Pa/m)	19,6181	39,2362	49,0452	78,4723	98,0904	156,945	333,507
HETP <sub>exp</sub> (m)	0,22369	0,26639	0,23097	0,23061	0,21830	0,20867	0,24070

continuação da tabela 4.3.

corrida nº	8
fluxo (Kg/m <sup>3</sup> s)	1,93581
$\rho_g$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2,24930
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	729,600
$\mu_g \times 10^6$ (Pa-s)	8,14250
$\mu_l \times 10^3$ (Pa-s)	0,24340
$D_g \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	4,58440
$D_l \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	6,39570
$P_{\text{exp}}(\text{cic6})$ (bar)	0,74489
$P_{\text{exp}}(\text{n-c7})$ (bar)	0,41442
$\Delta p/l_{\text{exp}}$ (Pa/m)	559,115
HETP <sub>exp</sub> (m)	0,24644

Tabela 4.4 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 300 mbar.

TESTE Nº 04							
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 300 mbar				TEMP. TOPO : 45,4 °C			
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO							
corrida n°	1	2	3	4	5	6	7
Fluxo (Kg/m <sup>2</sup> s)	0,18028	0,30763	0,41142	0,46169	0,52248	0,68728	0,81584
$\rho_f$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,96538	0,96538	0,96506	0,96554	0,96522	0,96522	0,96506
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	754,000	754,000	754,300	753,900	754,100	754,100	754,300
$\mu_f \times 10^6$ (Pa-s)	7,55750	7,55750	7,56010	7,55610	7,55880	7,55880	7,56010
$\mu_l \times 10^3$ (Pa-s)	0,27770	0,27770	0,27770	0,27770	0,27770	0,27770	0,27770
$D_f \times 10^3$ (m <sup>2</sup> /s)	9,94690	9,94690	9,94670	9,94700	9,94680	9,94680	9,94670
$D_l \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	5,11680	5,11680	5,11680	5,11680	5,11680	5,11680	5,11680
$P_{exp}(cic6)$ (bar)	0,30712	0,30712	0,30712	0,30712	0,30712	0,30712	0,30712
$P_{exp}(n-c7)$ (bar)	0,15568	0,15568	0,15568	0,15568	0,15568	0,15568	0,15568
$\Delta p/l_{exp}$ (Pa/m)	9,80904	29,4271	49,0452	58,8442	78,4723	98,0904	196,181
HETP <sub>exp</sub> (m)	0,24116	0,24629	0,22947	0,24865	0,23275	0,22950	0,22498

Tabela 4.5 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 225 mbar.

TESTE Nº 05							
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 225 mbar				TEMP. TOPO : 38,6 °C			
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO							
corrida n°	1	2	3	4	5	6	7
fluxo (Kg/m <sup>2</sup> s)	0,08457	0,18277	0,23819	0,28151	0,37423	0,56835	0,62833
$\rho_f$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,74009	0,73791	0,73815	0,73840	0,73948	0,73876	0,73840
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	758,200	760,700	760,200	759,900	758,800	759,700	759,900
$\mu_f \times 10^6$ (Pa-s)	7,37830	7,40490	7,39830	7,39690	7,38500	7,39290	7,39690
$\mu_l \times 10^3$ (Pa-s)	0,28710	0,28730	0,28730	0,28720	0,28710	0,28720	0,28720
$D_f \times 10^3$ (m <sup>2</sup> /s)	1,27600	1,27600	1,27600	1,27600	1,27600	1,27600	1,27600
$D_l \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	4,82240	4,82240	4,82240	4,82240	4,82240	4,82240	4,82240
$P_{exp}(cic6)$ (bar)	0,23504	0,23504	0,23504	0,23504	0,23504	0,23504	0,23504
$P_{exp}(n-c7)$ (bar)	0,11572	0,11572	0,11572	0,11572	0,11572	0,11572	0,11572
$\Delta p/l_{exp}$ (Pa/m)	9,80904	19,6181	29,4271	39,2362	49,0452	98,0904	147,136
HETP <sub>exp</sub> (m)	0,34820	0,23594	0,25646	0,27007	0,30259	0,26740	0,24893

continuação da tabela 4.5.

corrida n°	8	9	10
fluxo (Kg/m <sup>2</sup> s)	0,71947	0,76907	0,80574
$\rho_2$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,73828	0,73815	0,73815
$\rho_1$ (Kg/m <sup>3</sup> )	760,100	760,200	760,200
$\mu_2 \times 10^4$ (Pa-s)	7,39830	7,39960	7,39960
$\mu_1 \times 10^3$ (Pa-s)	0,28730	0,28730	0,28730
$D_2 \times 10^3$ (m <sup>2</sup> /s)	1,27600	1,27600	1,27600
$D_1 \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	4,82240	4,82240	4,82240
$P_{exp}$ (cic6) (bar)	0,23504	0,23504	0,23504
$P_{exp}$ (n-c7) (bar)	0,11572	0,11572	0,11572
$\Delta p/l_{exp}$ (Pa/m)	215,799	294,271	539,497
HETP <sub>exp</sub> (m)	0,25011	0,24411	0,24637

Tabela 4.6 - Resultados dos testes experimentais com a pressão de 176 mbar.

TESTE Nº 06							
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 176 mbar				TEMP. TOPO : 33,1°C			
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO							
corrida n°	1	2	3	4	5	6	7
fluxo (Kg/m <sup>2</sup> s)	0,09173	0,21319	0,31138	0,38130	0,48596	0,59642	0,63762
$\rho_2$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,58621	0,58650	0,58640	0,58631	0,58640	0,58679	0,58679
$\rho_1$ (Kg/m <sup>3</sup> )	766,000	765,600	765,700	765,900	765,700	765,200	765,200
$\mu_2 \times 10^4$ (Pa-s)	7,28130	7,27730	7,27860	7,27990	7,27860	7,27330	7,27330
$\mu_1 \times 10^3$ (Pa-s)	0,29520	0,29520	0,29520	0,29520	0,29520	0,29510	0,29510
$D_2 \times 10^3$ (m <sup>2</sup> /s)	1,57900	1,57900	1,57900	1,57900	1,57900	1,57900	1,57900
$D_1 \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	4,59740	4,59740	4,59740	4,59740	4,59740	4,59740	4,59740
$P_{exp}$ (cic6) (bar)	0,18730	0,18730	0,18730	0,18730	0,18730	0,18730	0,18730
$P_{exp}$ (n-c7) (bar)	0,08994	0,08994	0,08994	0,08994	0,08994	0,08994	0,08994
$\Delta p/l_{exp}$ (Pa/m)	9,80904	19,6181	29,4271	49,0452	98,0904	137,327	186,372
HETP <sub>exp</sub> (m)	0,17801	0,24413	0,23487	0,21862	0,22658	0,25841	0,25752

continuação da tabela 4.6.

corrida n°	8
fluxo (Kg/m <sup>2</sup> s)	0,64779
$\rho_g$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,58698
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	765,000
$\mu_g \times 10^6$ (Pa-s)	7,27070
$\mu_l \times 10^3$ (Pa-s)	0,29510
$D_g \times 10^5$ (m <sup>2</sup> /s)	1,57900
$D_l \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	4,59740
$P_{exp}(cic6)$ (bar)	0,18730
$P_{exp}(n-c7)$ (bar)	0,08994
$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	235,417
HETP <sub>(exp)</sub> (m)	0,27033

UFCC

### 4.3 Comparação dos Resultados Experimentais com as Correlações Existentes na Literatura para a Perda de Carga.

#### 4.3.1 Modelo de Bravo

Nesta etapa do trabalho procurou-se comparar os resultados obtidos experimentalmente com a equação de Bravo et alii (1986,1989,1990).

A equação de Bravo et alii, como já foi exposto, é válida para enchimentos estruturados, constituídos de placas metálicas sem furos e para escoamento abaixo da região de carga. Veja § 2.4.

A equação para a perda de carga é dada por:

$$\frac{\Delta p}{l} = \left[ 0.171 + \left( \frac{92.7}{Re_g} \right) \right] \left( \rho_g \frac{Ue_g^2}{S} \right) \left[ \frac{1}{1 - C_3 F_{rl}^{0.5}} \right]^5 \quad (2.2)$$

onde o diâmetro equivalente é tomado como S. S é o tamanho do lado do canal. Para o recheio em estudo infelizmente não se dispõe de todas as informações geométricas necessárias para a utilização da equação de Bravo. Como tentativa de solucionar o problema, foram utilizadas as características geométricas do recheio metálico BX da Sulzer, pois segundo o fabricante, que é o mesmo do recheio KERAPACK, estes recheios apresentam características semelhantes. Veja na tabela 4.7 as características geométricas utilizadas pelo KERAPACK.

**Tabela 4.7 - Características geométricas do recheio KERAPACK.**

Área Específica:	450 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Porosidade $\epsilon$ :	0.75
Ângulo de corrugação $\theta$ :	60°
* Altura do canal h:	0.0064 m
* Lado do canal S:	0.0089 m
* Base do canal B:	0.0128 m

\* Dados do recheio SULZER BX (Fair, J.R. and J.L.Bravo, Chem. Eng. Prog., p.20, Jan. 1990).

Sabe-se de antemão que isto poderá levar a desvios maiores em relação aos resultados experimentais. Nas tabelas 4.8 a 4.13 são mostradas as comparações entre o modelo e os pontos experimentais. Foi também utilizada a constante  $C_3$  do recheio SULZER BX cujo valor é  $C_3=3,38$ .

Comparando os dados obtidos experimentalmente com os dados obtidos com o modelo preditivo de Bravo, observa-se que eles apresentam grandes desvios entre si, apresentando em média desvios superiores a 70 %. Veja as figuras 4.1 a 4.6. Nas figuras 4.7 a 4.12, mostram-se como varia a perda de carga com a velocidade do vapor. Percebe-se que à medida que a velocidade do vapor aumenta, conseqüentemente aumenta a perda de carga.

Como já mencionado, a equação de Bravo et alii foi desenvolvida para recheios metálicos sem orifícios e o recheio em estudo é constituído de material cerâmico, possuindo também uma



área superficial diferente. Estes recheios também diferem quanto a porosidade, veja tabelas 2.2 e 4.7. Completando, existe o agravante de se ter que utilizar alguma características geométrica do recheio metálico **SULZER BX** como dados para o recheio **KERAPACK** em estudo. Em função disto não causou surpresa o resultado apresentado por este modelo.

**Tabela 4.8. - comparação dos resultados experimentais com os calculados através da equação 2.2**

TESTE Nº 01				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 1008 mbar			TEMP. TOPO : 80.3 °C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$7,79700 \times 10^{-2}$	19,61808	2,03758	-89,61377
2	0,13861	29,42712	4,85564	-83,49944
3	0,30352	58,85424	18,36449	-68,79666
4	0,36856	107,89945	26,20541	-75,71312
5	0,50247	176,56273	47,20579	-73,26401
6	0,56306	274,65314	58,97517	-78,52741
7	0,64956	392,36162	78,38604	-80,02199

**Tabela 4.9. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.2.**

TESTE Nº 02				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 176 mbar			TEMP. TOPO : 33,1°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,15649	9,80904	2,72539	-72,21558
2	0,36350	19,61808	8,42918	-57,03364
3	0,53100	29,42712	14,83591	-49,58424
4	0,65034	49,04520	20,39811	-58,40958
5	0,82872	98,09041	30,29359	-69,11667
6	1,01641	137,32657	42,80315	-68,83113
7	1,08662	186,37180	48,04064	-74,22322
8	1,10361	235,41697	49,36167	-79,03225

**Tabela 4.10. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.2.**

TESTE Nº 03				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 225 mbar			TEMP. TOPO : 38,6 °c	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,11427	9,80904	1,97181	-79,89802
2	0,24770	19,61808	5,44110	-72,26490
3	0,32269	29,42712	7,94349	-73,00623
4	0,38124	39,23616	10,18269	-74,04768
5	0,50607	49,04520	15,79969	-67,78544
6	0,76932	98,09041	31,48558	-67,90147
7	0,85094	147,13561	37,42860	-74,56183
8	0,97452	215,79889	47,43536	-78,01873
9	1,04189	294,27122	53,40374	-81,85221
10	1,09157	539,49723	58,04410	-89,24108

**tabela 4.11. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.2.**

TESTE Nº 04				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 300 mbar			TEMP. TOPO : 45,4 °c	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,18675	9,80904	4,13243	-57,87121
2	0,31867	29,42712	9,01233	-69,37406
3	0,42632	49,04520	14,23378	-70,97825
4	0,47817	58,84424	17,15694	-70,84843
5	0,54131	78,47232	21,07521	-73,14313
6	0,71205	98,09041	33,70630	-65,63752
7	0,84538	196,18100	45,68325	-76,71371

**Tabela 4.12. - Comparação dos pontos experimentais com os obtidos através da equação 2.2.**

TESTE Nº 05				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 745 mbar			TEMP. TOPO : 70,7°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$8,81121 \times 10^{-2}$	19,61808	2,12077	-89,18971
2	0,17500	39,23616	5,88552	-84,99976
3	0,24081	49,04520	9,88775	-79,83953
4	0,32861	78,47232	16,84942	-78,52820
5	0,37467	98,09041	21,24432	-78,34210
6	0,46458	156,94465	31,41256	-79,98495
7	0,62733	333,50738	55,40280	-83,38780
8	0,85975	559,11530	103,14460	-81,55218

**Tabela 4.13. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.2.**

TESTE Nº 06				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 850 mbar			TEMP. TOPO : 75,2°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$4,62355 \times 10^{-2}$	9,80904	0,94096	-90,40718
2	$6,78917 \times 10^{-2}$	19,61808	1,56199	-92,03799
3	0,12148	39,23616	3,59904	-90,82724
4	0,21171	49,04520	8,69593	-82,26840
5	0,30002	58,85424	15,80214	-73,15040
6	0,32767	78,47232	18,47990	-76,45042
7	0,38407	88,28136	24,62307	-72,10842
8	0,41809	107,89945	28,78127	-73,32585
9	0,44433	156,94465	32,22469	-79,46748
10	0,56107	215,79889	50,17246	-76,75036

continuação da tabela 4.13.

corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
11	0,63909	353,12546	64,64587	-81,69323
12	0,67453	500,26107	71,88065	-85,63137
13	0,76730	765,10516	92,97768	-87,84772
14	0,82406	912,24077	107,42170	-88,22442
15	0,88669	1206,5120	124,74860	-89,66039

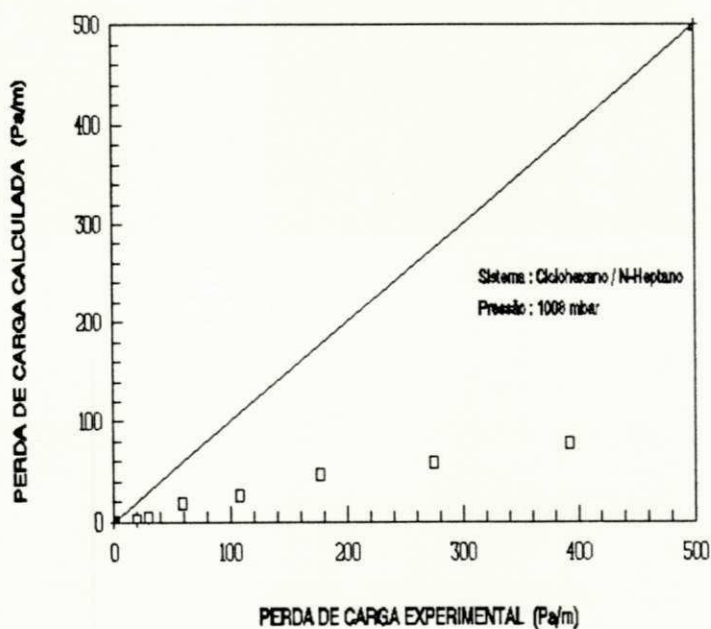


Figura 4.1 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.2.

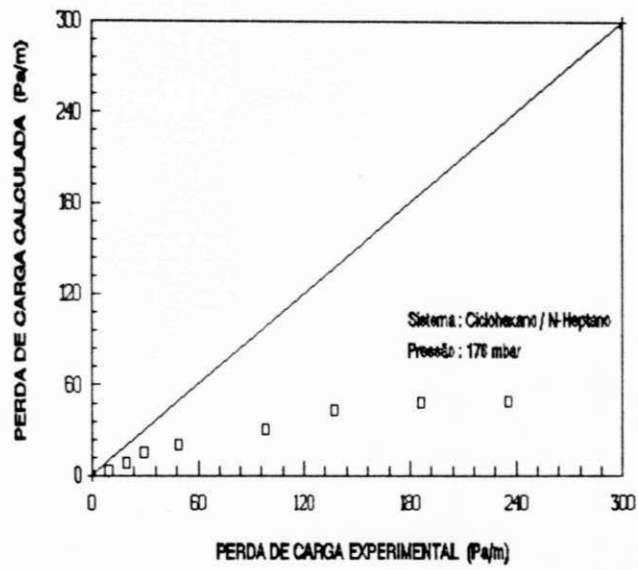


Figura 4.2. - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.2.

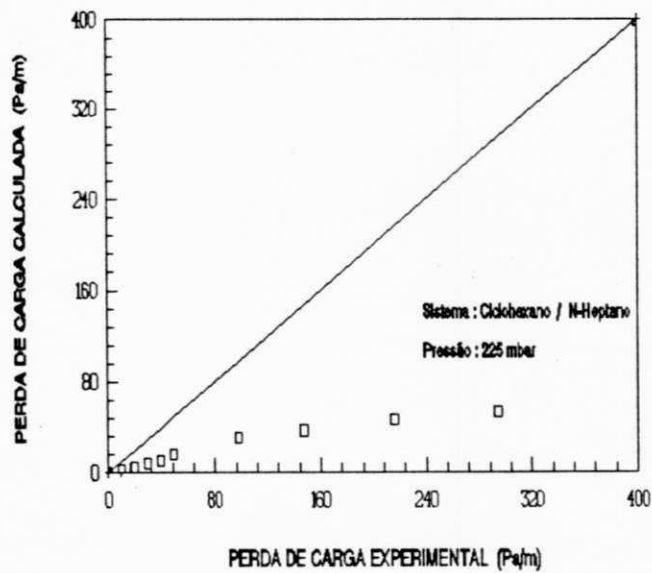


Figura 4.3. - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.2.

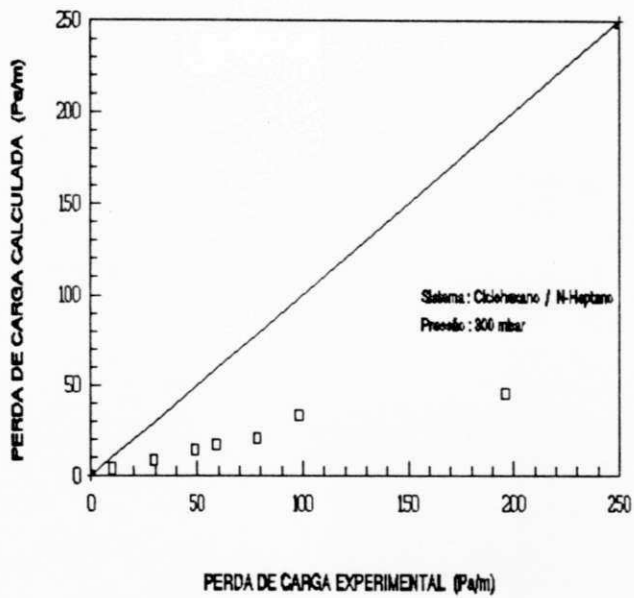


Figura 4.4 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.2.

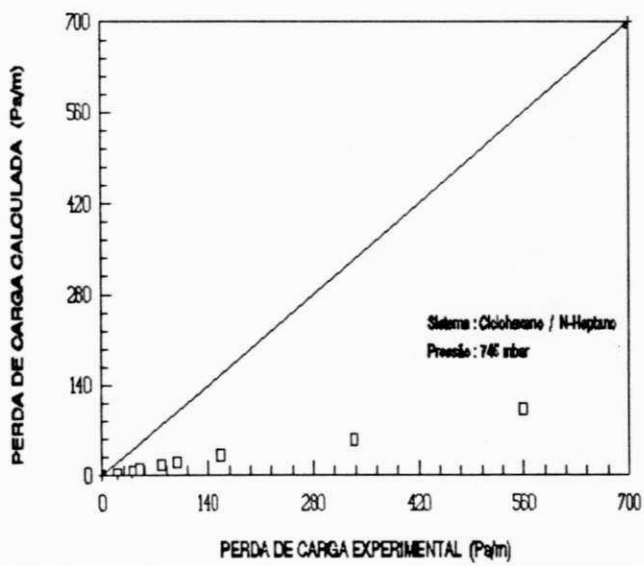


Figura 4.5 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.2.

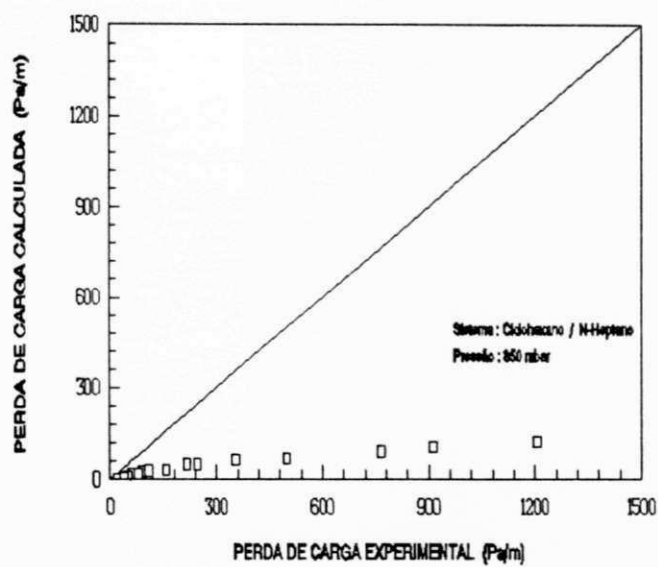


Figura 4.6 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.2.

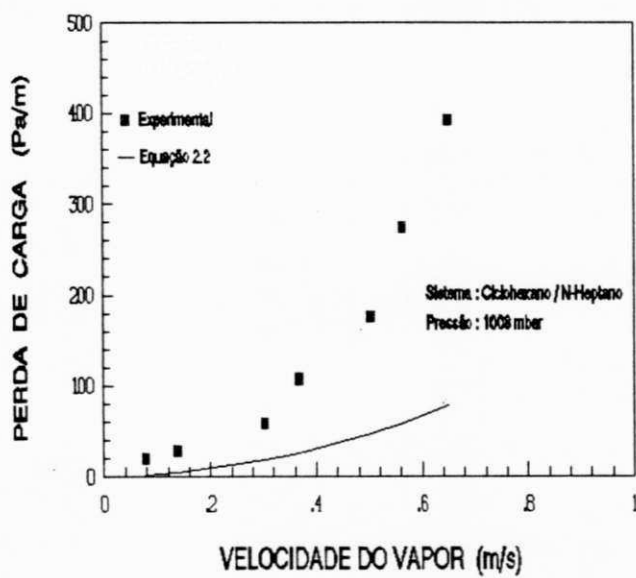


Figura 4.7 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.



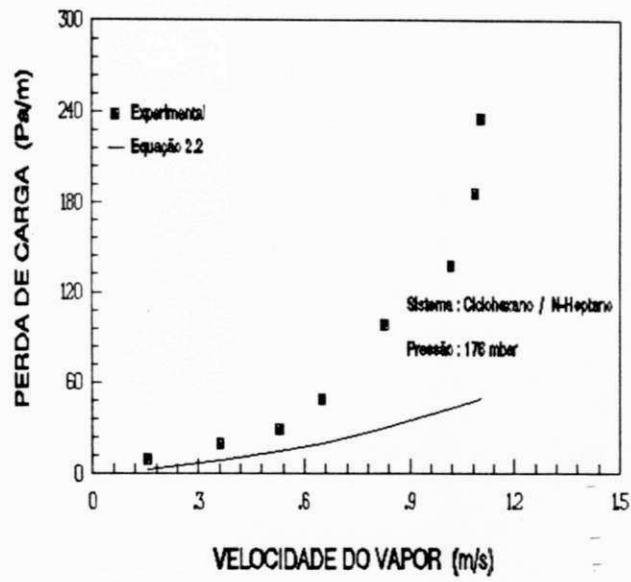


Figura 4.8 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

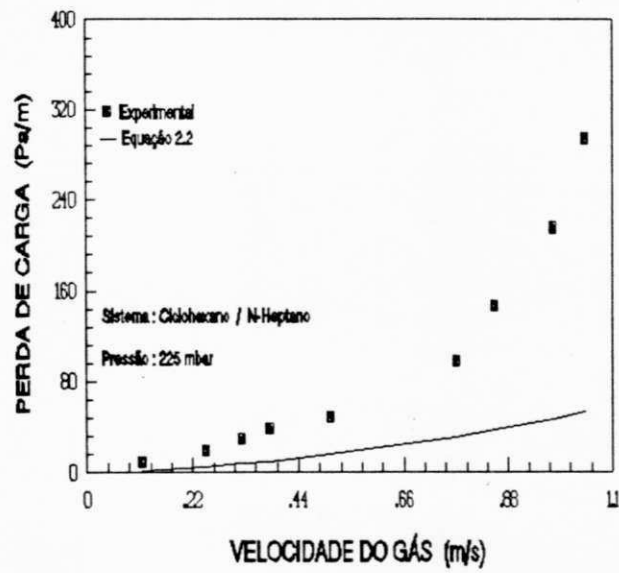


Figura 4.9 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

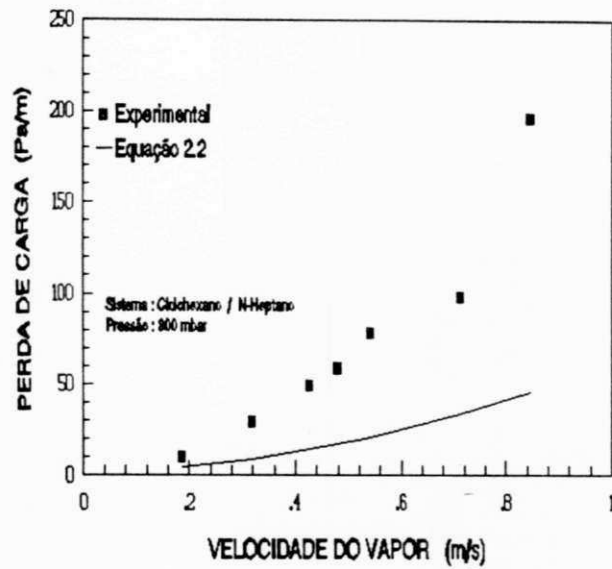


Figura 4.10 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

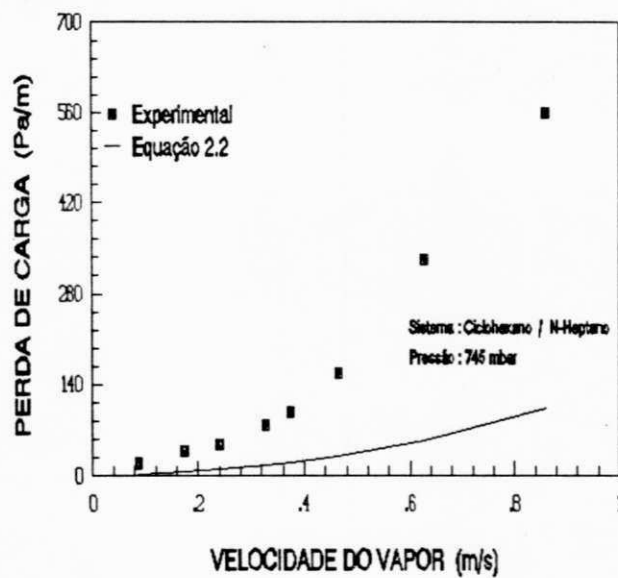


Figura 4.11 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

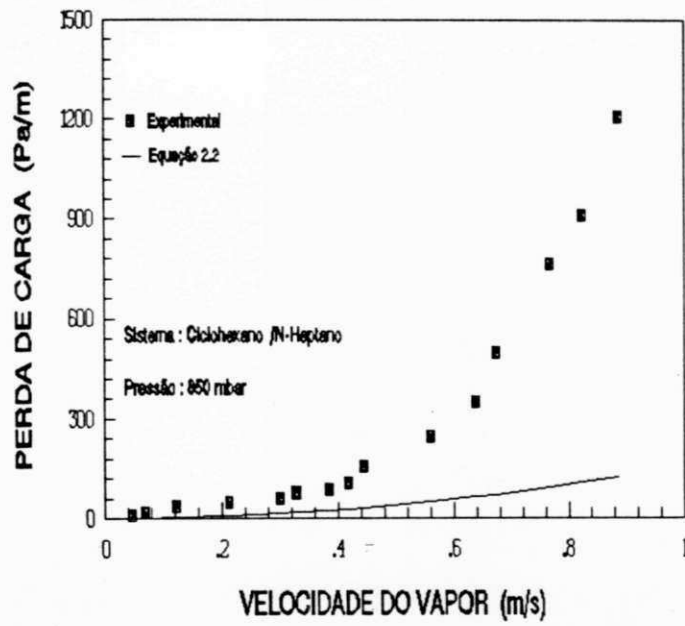


Figura 4.12 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

#### 4.3.2 Modelo de Stichlmair

A equação de **Stichlmair et alii, 1989** tem a sua aplicabilidade tanto para enchimentos randômicos, como para enchimentos estruturado e admite o estudo na região de carga e acima. Infelizmente, como já mencionado durante a abordagem do modelo de **Bravo et alii**, não se dispõe de todas os dados necessários para que se possa utilizar a equação de **Stichlmair** adequadamente. Como solução, foi utilizado o mesmo procedimento que o do modelo de **Bravo et alii**, veja § 4.3.1.

A equação de **Stichlmair et alii** é dada por:

$$\frac{\Delta p_{irr}}{\Delta p_d} = \frac{(1-\epsilon[1-h_o/\epsilon(1+20[\Delta p_{irr}/(Z\rho_l g)]^2)](1-\epsilon)^{-1})^{(2+c)/3}}{(1-h_o/\epsilon(1+20[\Delta p_{irr}/(Z\rho_l g)]^2))^{4.65}} \quad (2.8)$$

A equação de **Stichlmair et alii** por ser transcendental exige para a sua solução um procedimento iterativo.

Ao ser feita a comparação deste modelo preditivo com os dados que foram obtidos experimentalmente, tabelas 4.15 a 4.20, observa-se grandes desvios semelhante ao que ocorreu com o modelo de **Bravo**, como são vistos nas figuras 4.13 a 4.18. Nas figuras 4.19 a 4.24 mostram-se como varia a perda de carga com a velocidade do vapor. Fica claro a relação direta entre o aumento da velocidade do gás e o aumento da perda de carga. Estes desvios, como já foi colocado no § 4.3.1, deve-se em boa parte ao uso de dados pertencentes a outro tipo de recheio. Além dos dados da tabela 4.7, para este modelo foram utilizados ainda as três constantes do recheio **SULZER BX** como constantes do recheio

KERAPACK em estudo. Veja tabela 4.14.

**Tabela 4.14 - Constantes utilizadas pelo recheio KERAPACK.**

$C_1 = 15.0$	$C_2 = 2.0$	$C_3 = 0.35$
--------------	-------------	--------------

OBS: Dados obtidos do Gas Separation & Purification, p.22 (March, 1989).

**Tabela 4.15. - comparação dos dados experimentais com os obtidos através da equação 2.8.**

TESTE Nº 01				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 1008 mbar			TEMP. TOPO : 80,3°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$7,79700 \times 10^{-2}$	19,61808	3,16241	-83,88014
2	0,13861	29,42712	8,79341	-70,12141
3	0,30352	58,85424	39,92367	-32,16518
4	0,36856	107,89945	59,40220	-44,94671
5	0,50247	176,56273	114,29850	-35,26467
6	0,56306	274,65314	146,65310	-46,73447
7	0,64956	392,36162	200,51280	-48,89591

Tabela 4.16. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8.

TESTE Nº 02				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 176 mbar			TEMP. TOPO : 33,1°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,15649	9,80904	3,12537	-66,10670
2	0,36350	19,61808	13,10266	-33,21133
3	0,53100	29,42712	25,48644	-13,39131
4	0,65034	49,04520	36,83507	-24,89568
5	0,82872	98,09041	57,88738	-40,98569
6	1,01641	137,32657	85,57989	-37,68148
7	1,08662	186,37180	97,43139	-47,72202
8	1,10361	235,41697	100,45330	-57,32965

Tabela 4.17. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8.

TESTE Nº 03				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 225 mbar			TEMP. TOPO : 38,6°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,11427	9,80904	2,34217	-76,12236
2	0,24770	19,61808	8,07416	-58,84329
3	0,32269	29,42712	12,68727	-56,88581
4	0,38124	39,23616	17,00320	-56,66444
5	0,50607	49,04520	28,35861	-42,17863
6	0,76932	98,09041	62,22725	-36,56133
7	0,85094	147,13561	75,59580	-48,62168
8	0,97452	215,79889	98,59237	-54,31285
9	1,04189	294,27122	112,54450	-61,75483
10	1,09157	539,49723	123,50430	-77,10752

**Tabela 4.18. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8.**

TESTE Nº 04				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 300 mbar			TEMP. TOPO : 45,4°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,18675	9,80904	6,08244	-37,99148
2	0,31867	29,42712	15,34580	-47,85149
3	0,42632	49,04520	26,05674	-46,87199
4	0,47817	58,84424	32,28225	-45,14885
5	0,54131	78,47232	40,79719	-48,01074
6	0,71205	98,09041	69,30324	-29,34759
7	0,84538	196,18100	97,37691	-50,36374

**Tabela 4.19. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8.**

TESTE Nº 05				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 745 mbar			TEMP. TOPO : 70,7°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$8,81121 \times 10^{-2}$	19,61808	3,15813	-83,90193
2	0,17500	39,23616	10,56883	-73,06355
3	0,24081	49,04520	19,18073	-60,89173
4	0,32861	78,47232	35,09488	-55,27738
5	0,37467	98,09041	45,50229	-53,61118
6	0,46458	156,94465	70,43526	-55,12096
7	0,62733	333,50738	132,3453	-60,31712
8	0,85975	559,11530	263,4328	52,88400

Tabela 4.20. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.8.

TESTE Nº 06				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 850 mbar			TEMP. TOPO : 75,2°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$4,62355 \times 10^{-2}$	9,80904	1,20149	-87,75125
2	$6,78917 \times 10^{-2}$	19,61808	2,23148	-88,62541
3	0,12148	39,23616	6,05636	-84,56436
4	0,21171	49,04520	16,82617	-65,69030
5	0,30002	58,85424	33,10510	-43,75070
6	0,32767	78,47232	39,47751	-49,69245
7	0,38407	88,28136	54,43775	-38,33608
8	0,41809	107,89945	64,78803	-39,95518
9	0,44433	156,94465	73,47628	-53,18332
10	0,56107	215,79889	120,17090	-44,31349
11	0,63909	353,12546	159,16100	-54,92791
12	0,67453	500,26107	178,98790	-64,22110
13	0,76730	765,10516	238,00410	-68,89263
14	0,82406	912,24077	279,24380	-69,38928
15	0,88669	1206,5120	329,46390	-72,69286



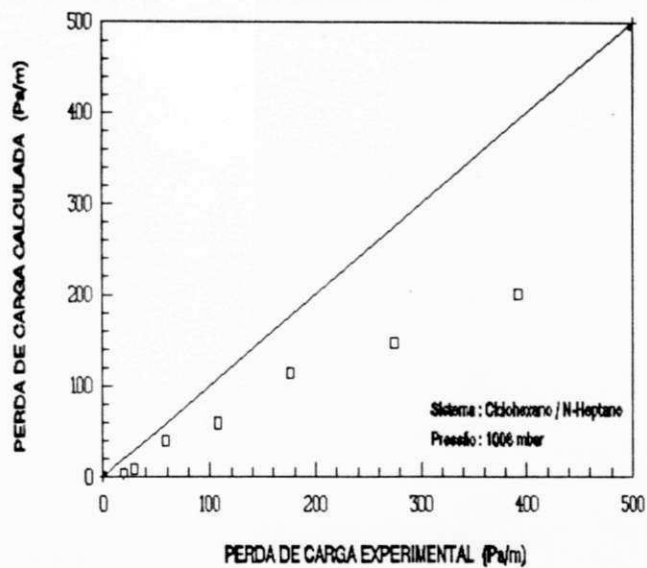


Figura 4.13 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos através da equação 2.8.

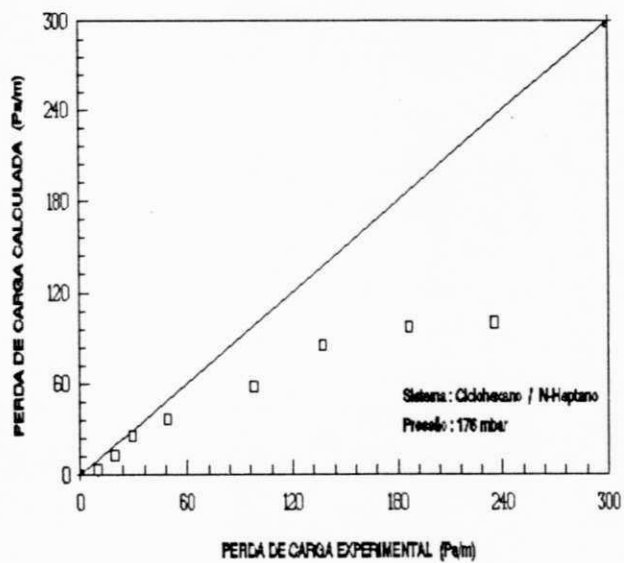


Figura 4.14 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos através da equação 2.8.

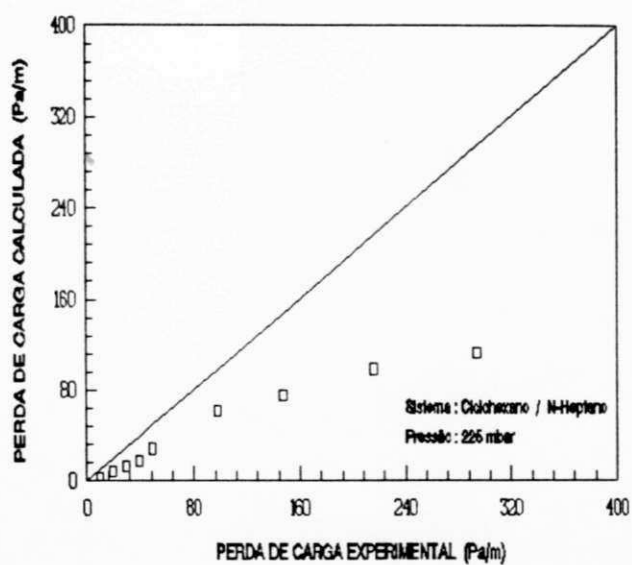


Figura 4.15 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos através da equação 2.8.

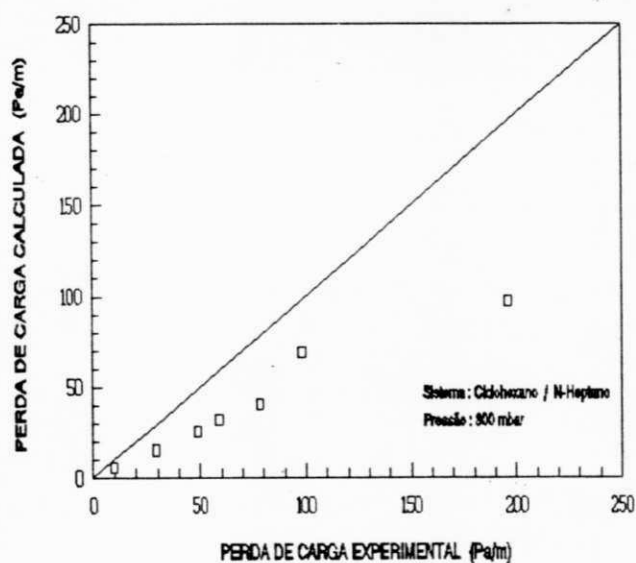


Figura 4.16 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos através da equação 2.8.

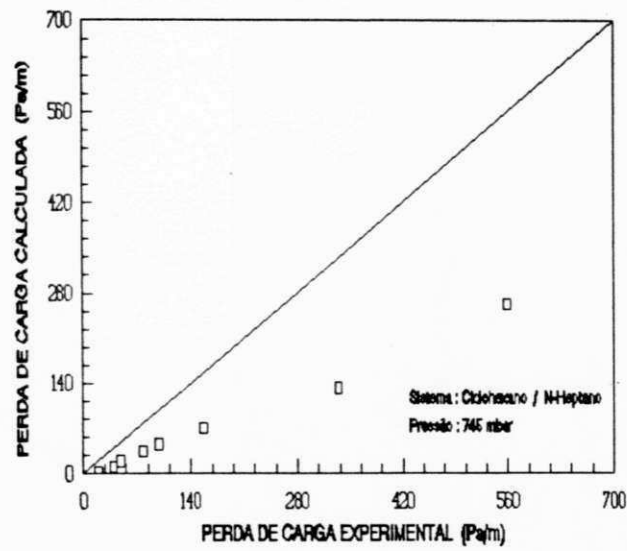


Figura 4.17 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos através da equação 2.8.

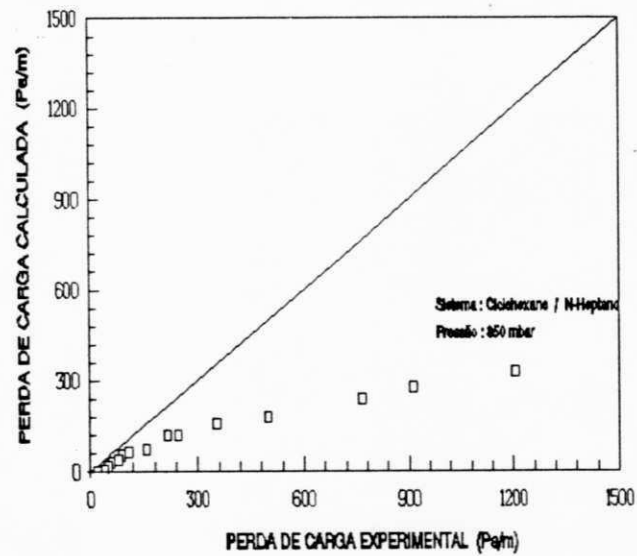


Figura 4.18 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos através da equação 2.8.

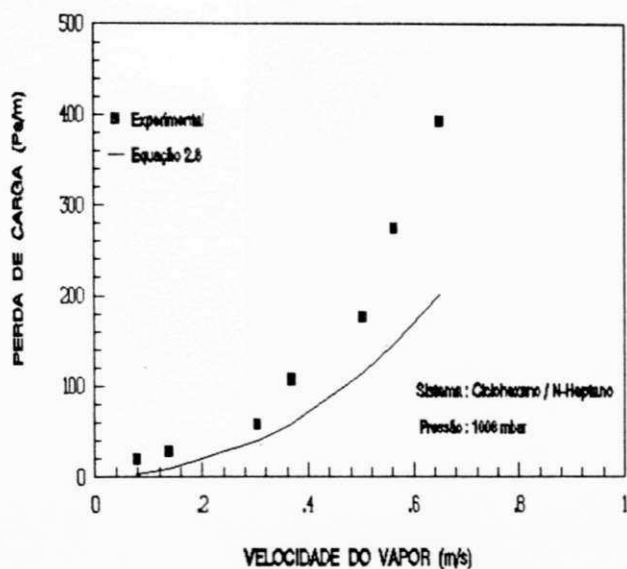


Figura 4.19 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

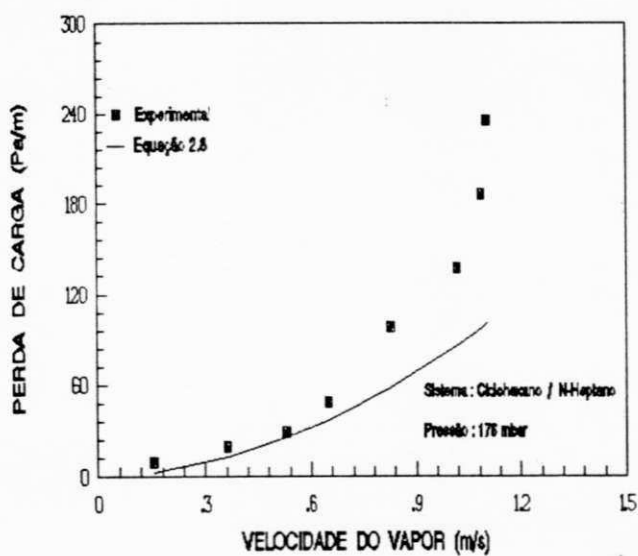


Figura 4.20 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

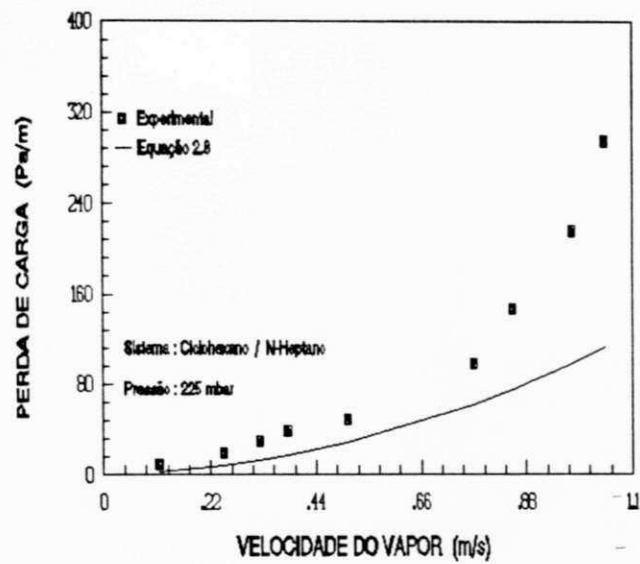


Figura 4.21 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

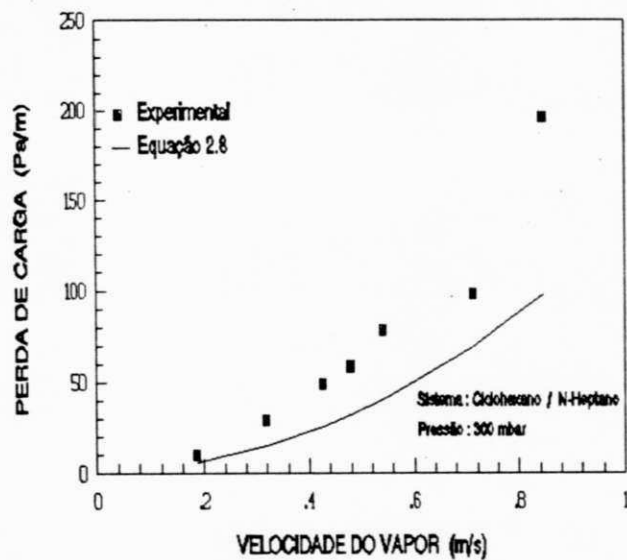


Figura 4.22 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

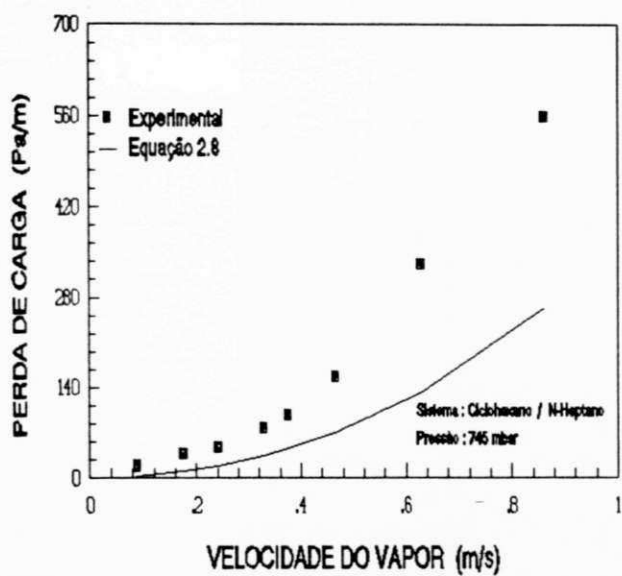


Figura 4.23 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

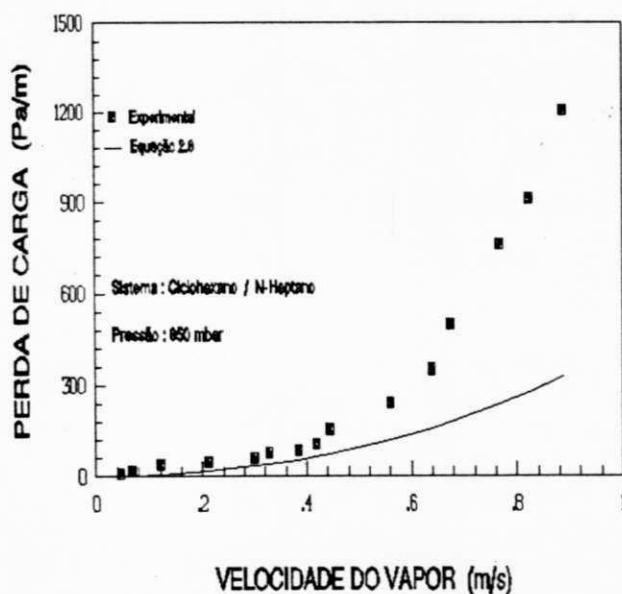


Figura 4.24 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

#### 4.4 Comparação dos Pontos Experimentais com o Modelo preditivo de Bravo Para a Determinação da Eficiência

Procurou-se fazer uma comparação do modelo preditivo de Bravo com a eficiência experimental calculada pela relação de Fenske:

$$HETP = \frac{Z \ln \alpha_{21}}{\ln [(x_2/x_1)_D (x_1/x_2)_B]} \quad (4.1)$$

onde: Z é o comprimento do recheio. No presente caso o comprimento foi de 2,0 metros,  $\alpha_{21}$  é a volatilidade relativa, x é a fração molar, o subscrito 2 é para o mais volátil enquanto que o subscrito 1 é para o menos volátil, O subscrito D significa destilado, enquanto o subscrito B significa bottoms, (Hufton, J. R., Bravo, J. L., Fair, J. R., 1988).

Foi utilizado o modelo preditivo desenvolvido por Bravo et alii (1985), que como já mencionado anteriormente foi desenvolvido para ser aplicado em recheios corrugados feitos de materiais metálicos. A equação final de Bravo é a seguinte como é mostrada abaixo:

$$HETP = H_{OG} [\ln \lambda / (\lambda - 1)] \quad (2.27)$$

onde:  $H_{OG}$  é a altura da unidade de transferência total da fase gasosa,  $\lambda$  é a razão de inclinação linha de operação - linha de equilíbrio. Para mais detalhes veja § 2.5.

Ao se comparar o modelo preditivo com os pontos obtidos experimentalmente, tabelas 4.21 a 4.26, observa-se que o mesmo

apresenta grandes desvios em relação aos pontos experimentais. Nas figuras 4.25 a 4.30 são plotados alguns gráficos da eficiência (HETP) experimental e preditiva versus o fator de fluxo da fase vapor. Percebe-se que o HETP predito mostra-se mais sensível ao aumento da vazão de vapor do que o HETP experimental que se mantém mais ou menos estável. Os dados característicos do recheio em estudo são os mesmos da tabela 4.7. Como já foi diversas vezes mencionado, uma das possíveis causas para a ocorrência de grandes desvios deve-se ao fato de que este modelo foi originariamente desenvolvido para ser aplicado em recheios metálicos, enquanto o recheio usado neste trabalho é constituído de material cerâmico. Outro agravante é o fato de se ter usado alguns dados do recheio Sulzer BX como dados do recheio estudado, KERAPACK, em virtude de não se ter ainda na literatura nada avaliado sobre este recheio. Também não foi possível neste trabalho fazer a determinação das propriedades que faltam para a completa caracterização do recheio estudado, uma vez que não foi possível conseguir uma amostra deste recheio.



Tabela 4.21. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos com as equações 2.16 e 2.27.

TESTE Nº 01				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 1008 mbar			TEMP. TOPO : 80,3°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	f. de fluxo (Kg/m) <sup>3</sup> /s	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	0,13475	0,27483	1,8182 x 10 <sup>-2</sup>	-93,3843
2	0,23936	0,27697	2,3643 x 10 <sup>-2</sup>	-91,4637
3	0,52402	0,22090	3,3759 x 10 <sup>-2</sup>	-84,7171
4	0,63632	0,21854	3,6814 x 10 <sup>-2</sup>	-83,1542
5	0,86751	0,21723	4,2248 x 10 <sup>-2</sup>	-80,5515
6	0,97204	0,21498	4,4447 x 10 <sup>-2</sup>	-79,3251
7	1,12127	0,20354	4,7377 x 10 <sup>-2</sup>	-76,7239

Tabela 4.22. - Comparação entre os pontos experimentais e os obtidos através das equações 2.16 e 2.27.

TESTE Nº 02				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 176 mbar			TEMP. TOPO : 33,1°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	f. fluxo (Kg/m) <sup>3</sup> /s	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	0,11981	0,17801	4,44095 x 10 <sup>-2</sup>	-75,05231
2	0,27838	0,24413	6,21083 x 10 <sup>-2</sup>	-74,55977
3	0,40662	0,23487	7,20334 x 10 <sup>-2</sup>	-69,33040
4	0,49797	0,21862	7,79232 x 10 <sup>-2</sup>	-64,35603
5	0,63461	0,22658	8,54136 x 10 <sup>-2</sup>	-62,30239
6	0,77859	0,25841	9,20312 x 10 <sup>-2</sup>	-64,38575
7	0,83237	0,25752	9,43621 x 10 <sup>-2</sup>	-63,35774
8	0,84552	0,27033	9,47950 x 10 <sup>-2</sup>	-64,93360

Tabela 4.23. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através das equações 2.16 e 2.27.

TESTE Nº 03				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 225 mbar			TEMP. TOPO : 38,6°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	f. fluxo (Kg/m) <sup>3</sup> /s	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	0,09831	0,34820	3,58322 x 10 <sup>-2</sup>	-89,70941
2	0,21278	0,23594	4,99222 x 10 <sup>-2</sup>	-78,84108
3	0,27724	0,25646	5,54923 x 10 <sup>-2</sup>	-78,36205
4	0,32760	0,27007	5,92704 x 10 <sup>-2</sup>	-78,05385
5	0,43518	0,30259	6,62006 x 10 <sup>-2</sup>	-75,29205
6	0,66124	0,26740	7,81824 x 10 <sup>-2</sup>	-70,76182
7	0,73121	0,24893	8,14380 x 10 <sup>-2</sup>	-67,28419
8	0,83734	0,25011	8,58562 x 10 <sup>-2</sup>	-65,67240
9	0,89515	0,24411	8,81337 x 10 <sup>-2</sup>	-63,89583
10	0,93783	0,24637	8,97017 x 10 <sup>-2</sup>	-63,59032

Tabela 4.24. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 2.16 e 2.27.

TESTE Nº 04				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 300 mbar			TEMP. TOPO : 45,4°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	f. fluxo (Kg/m) <sup>3</sup> /s	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	0,18348	0,24117	4,08019 x 10 <sup>-2</sup>	-83,08113
2	0,31310	0,24629	5,09874 x 10 <sup>-2</sup>	-79,29781
3	0,41880	0,22947	5,75534 x 10 <sup>-2</sup>	-74,91900
4	0,46986	0,24865	6,02108 x 10 <sup>-2</sup>	-75,78450
5	0,53181	0,23275	6,34005 x 10 <sup>-2</sup>	-72,76057
6	0,69956	0,22950	7,08368 x 10 <sup>-2</sup>	-69,13421
7	0,83048	0,22498	7,59170 x 10 <sup>-2</sup>	-66,25600

Tabela 4.25. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através das equações 2.16 e 2.27.

TESTE Nº 05				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 745 mbar			TEMP. TOPO : 70.7°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	f. fluxo (Kg/m) <sup>5</sup> /s	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	0,13215	0,22369	2,16372 x 10 <sup>-2</sup>	-90,3270
2	0,26266	0,26639	2,92179 x 10 <sup>-2</sup>	-89,0321
3	0,36123	0,23097	3,37922 x 10 <sup>-2</sup>	-85,3694
4	0,49321	0,23061	3,87816 x 10 <sup>-2</sup>	-83,1831
5	0,56192	0,21830	4,10921 x 10 <sup>-2</sup>	-81,1765
6	0,69670	0,20867	4,51549 x 10 <sup>-2</sup>	-78,3607
7	0,94108	0,24070	5,13111 x 10 <sup>-2</sup>	-78,6823
8	1,29008	0,24644	5,88383 x 10 <sup>-2</sup>	-76,1251

Tabela 4.26. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através das equações 2.16 e 2.27.

TESTE Nº 06				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 850 mbar			TEMP. TOPO : 75,2°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	f. fluxo (Kg/m) <sup>5</sup> /s	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	7,3868 x 10 <sup>-2</sup>	0,32316	1,51224 x 10 <sup>-2</sup>	-95,3205
2	0,10835	0,28376	1,81386 x 10 <sup>-2</sup>	-93,6078
3	0,19380	0,26830	2,36237 x 10 <sup>-2</sup>	-91,1952
4	0,33756	0,24324	3,04026 x 10 <sup>-2</sup>	-87,5008
5	0,47828	0,23777	3,55236 x 10 <sup>-2</sup>	-85,0595
6	0,52245	0,24483	3,68937 x 10 <sup>-2</sup>	-84,9308
7	0,61241	0,24703	3,95549 x 10 <sup>-2</sup>	-83,9878
8	0,66662	0,24369	4,10806 x 10 <sup>-2</sup>	-83,1424
9	0,70839	0,23883	4,22200 x 10 <sup>-2</sup>	-82,3219

Continuação da tabela 4.26.

corrida nº	f. fluxo (Kg/m) <sup>0.5</sup> /s	HEPT <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
10	0,89451	0,23791	4,67693 × 10 <sup>-2</sup>	-80,3415
11	1,01890	0,23527	4,95140 × 10 <sup>-2</sup>	-78,9543
12	1,07522	0,22371	5,07568 × 10 <sup>-2</sup>	-77,3118
13	1,22309	0,22171	5,36941 × 10 <sup>-2</sup>	-75,7818
14	1,31346	0,21917	5,54031 × 10 <sup>-2</sup>	-74,7210
15	1,41304	0,20842	5,72614 × 10 <sup>-2</sup>	-72,5263

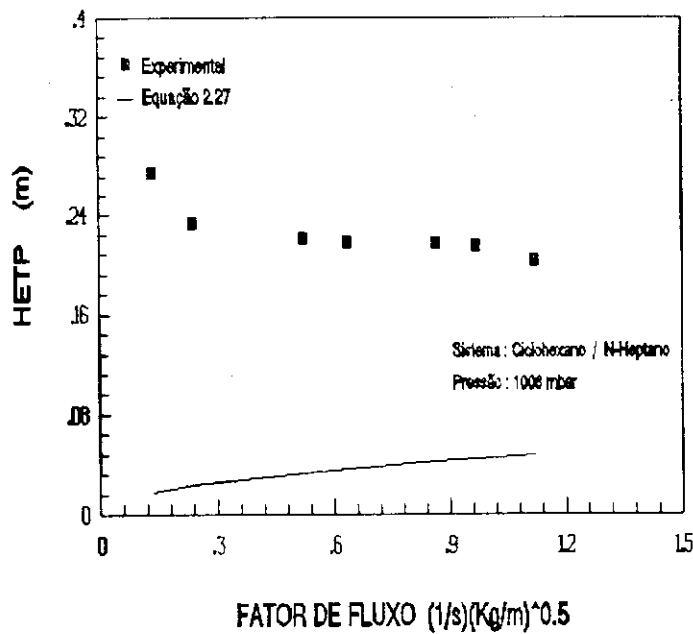


Figura 4.25 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação ao fator de fluxo.

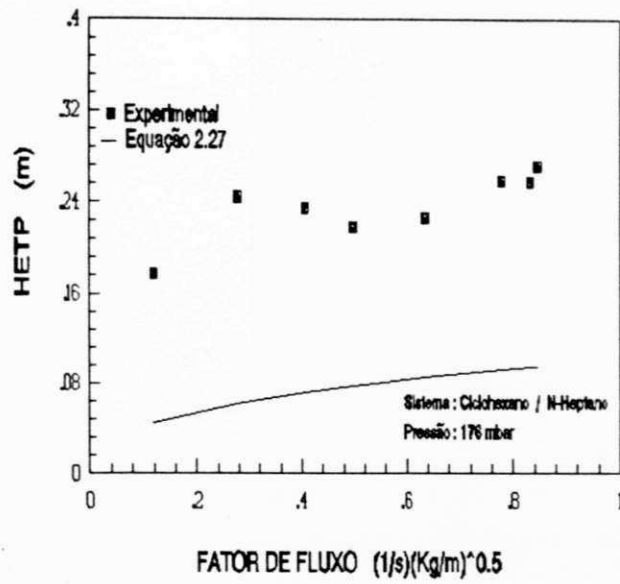


Figura 4.26 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação ao fator de fluxo.

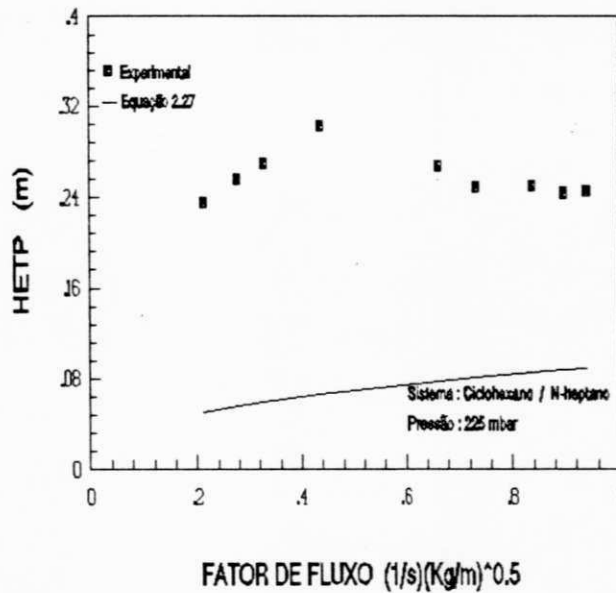


Figura 4.27 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação ao fator de fluxo.

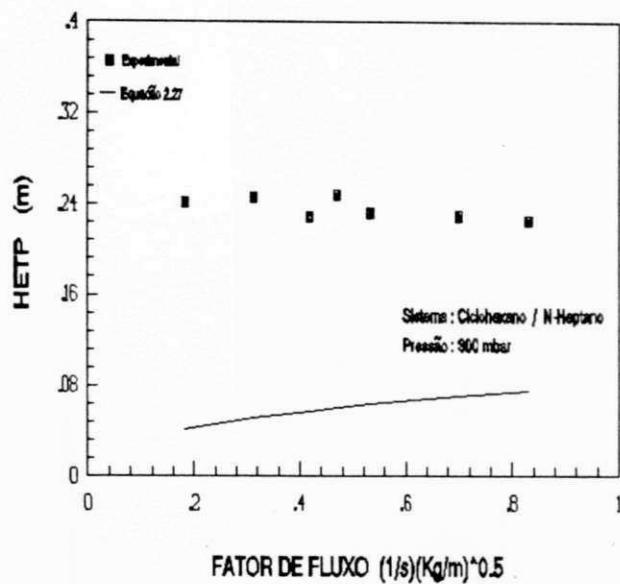


Figura 4.28 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação ao fator de fluxo.

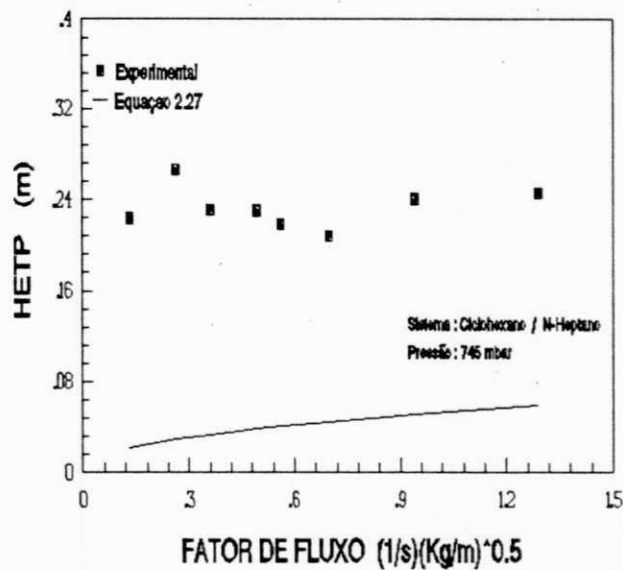


Figura 4.29 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação ao fator de fluxo.

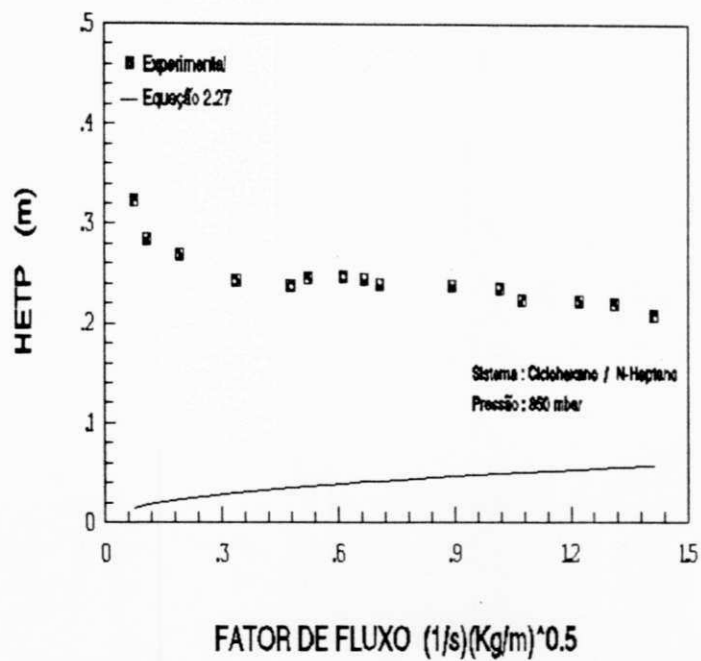


Figura 4.30 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação ao fator de fluxo.

#### **4.5 Modificações das Equações da Perda de Carga Para Sua Utilização em Recheios Estruturados KERAPACK.**

Após tentativas de aplicar ao recheio em estudo as correlações existentes na literatura para enchimentos estruturados, Percebeu-se que, devido a existência de diferenças entre o tipo de enchimento usado para o desenvolvimento das equações e o enchimento estudado neste trabalho e também tendo que utilizar dados de um outro recheio, que segundo o fabricante é similar ao recheio estudado, os resultados obtidos não foram satisfatórios. Passou-se então a procurar correlações próprias para o enchimento em estudo tomando como base as correlações da literatura.

##### **4.5.1 Modificações Utilizando Um Programa Elaborado Para o Ajuste Das Constantes Dos Modelos**

###### **4.5.1.1 Equação de Bravo**

Tomando como base a equação desenvolvida por Bravo et alii (1986), para recheios estruturados em escoamento bifásico, tentou-se desenvolver uma equação tipo a equação 2.2. Desta maneira, utilizando um programa especificamente elaborado para a realização do ajuste, chegou-se a equação 4.2,



$$\frac{\Delta p}{l} = \left[ 0.94086 + \left( \frac{92.7}{Re_g} \right) \right] \left( \rho_g \frac{Ue_g^2}{S} \right) \left[ \frac{1}{1 - C_3 F_{ri}^{0.5}} \right]^5 \quad (4.2)$$

onde o valor de  $C_3$  foi mantido com 3.38. As tabelas 4.27 a 4.32 mostram os resultados experimentais e os obtidos com a equação 4.2. Comparando os resultados experimentais com os que foram obtidos com a equação 4.2, figuras 4.31 a 4.36, nota-se um ajuste muito melhor que o oferecido pela equação 2.2. Nas figuras 4.37 a 4.42 são mostradas a variação da perda de carga experimental e preditiva com a velocidade do vapor, usando a equação 4.2.

Tabela 4.27. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 4.2.

TESTE Nº 01				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 1008 mbar			TEMP. TOPO : 80,3°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$7,79700 \times 10^{-2}$	19,61808	5,830561	-70,27966
2	0,13861	29,42712	16,99648	-42,24212
3	0,30352	58,85424	78,89665	34,05432
4	0,36856	107,89945	116,86820	8,31214
5	0,50247	176,56273	221,26370	25,31733
6	0,56306	274,65314	280,73740	2,21527
7	0,64956	392,36162	379,73590	-3,21788

Tabela 4.28. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 4.2.

TESTE Nº 02				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 176 mbar			TEMP. TOPO : 33,1°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,15649	9,80904	5,68895	-42,00300
2	0,36350	19,61808	24,57457	25,26493
3	0,53100	29,42712	49,53719	68,33855
4	0,65034	49,04520	72,71512	48,26144
5	0,82872	98,09041	115,93250	57,88738
6	1,01641	137,32657	172,43747	25,82586
7	1,08662	186,37180	197,06910	5,739800
8	1,10361	235,41697	203,25700	-13,66096

Tabela 4.29. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 4.2.

TESTE Nº 03				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 225 mbar			TEMP. TOPO : 38,6°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,11427	9,80904	3,96598	-59,58090
2	0,24770	19,61808	14,85264	-24,29108
3	0,32269	29,42712	23,98899	-18,47999
4	0,38124	39,23616	32,65992	-16,76066
5	0,50607	49,04520	55,74502	13,66049
6	0,76932	98,09041	125,07430	27,50918
7	0,85094	147,13561	152,38290	3,56627
8	0,97452	215,79889	199,23750	-7,67445
9	1,04189	294,27122	227,54570	-22,67483
10	1,09157	539,49723	249,72270	-53,71196

Tabela 4.30. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 4.2.

TESTE Nº 04				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 300 mbar			TEMP. TOPO : 45,4°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,18675	9,80904	11,13061	13,47298
2	0,31867	29,42712	29,58844	0,54821
3	0,42632	49,04520	51,34000	4,67895
4	0,47817	58,84424	64,04178	8,81421
5	0,54131	78,47232	81,41962	3,75584
6	0,71205	98,09041	139,44660	42,16130
7	0,84538	196,1810	196,17990	-5,4445 x 10 <sup>-4</sup>

Tabela 4.31. - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da equação 4.2.

TESTE Nº 05				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 745 mbar			TEMP. TOPO : 70,7°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$8,81121 \times 10^{-2}$	19,61808	5,75753	-70,65193
2	0,17500	39,23616	20,47711	-47,81063
3	0,24081	49,04520	37,80929	-22,90930
4	0,32861	78,47232	69,47232	-11,14084
5	0,37467	98,09041	90,43902	-7,80345
6	0,46458	156,94465	139,50220	-11,11375
7	0,62733	333,50738	258,50950	-22,48762
8	0,85975	559,11530	501,31820	-10,33725

Tabela 4.32. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através da equação 4.2.

TESTE Nº 06				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 850 mbar			TEMP. TOPO : 75,2°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$4,62355 \times 10^{-2}$	9,80904	2,07029	-78,89402
2	$6,78917 \times 10^{-2}$	19,61808	4,00223	-79,59929
3	0,12148	39,23616	11,49109	-70,71302
4	0,21171	49,04520	33,07831	-32,55105
5	0,30002	58,85424	65,63296	11,51782
6	0,32767	78,47232	78,27785	-0,24782
7	0,38407	88,28136	107,73800	22,03931
8	0,41809	107,89945	127,94460	18,57762
9	0,44433	156,94465	144,20400	-7,73564

continuação da tabela 4.32.

corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
10	0,56107	215,79889	234,02290	8,44489
11	0,63909	353,12546	307,03830	-13,05121
12	0,67453	500,26107	343,75890	-31,28410
13	0,76730	765,10516	451,58370	-40,97757
14	0,82406	912,24077	525,84900	-42,35634
15	0,88669	1206,5120	615,29690	-49,00201

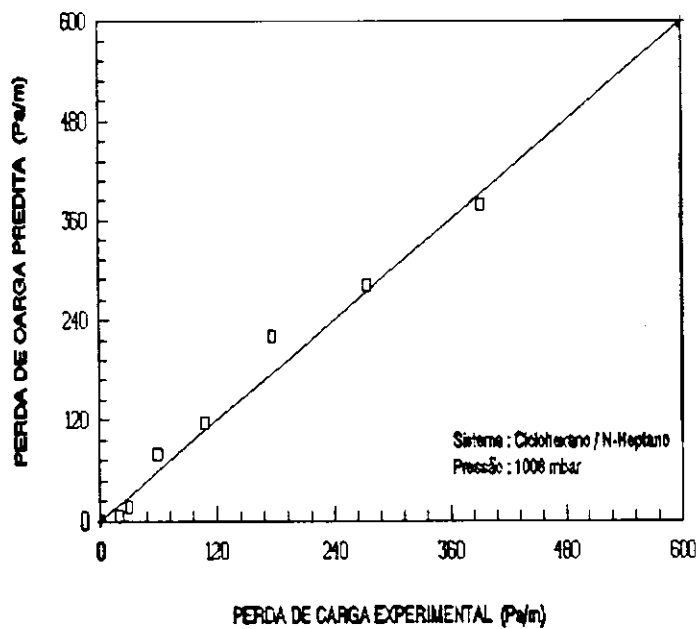


Figura 4.31 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.2.

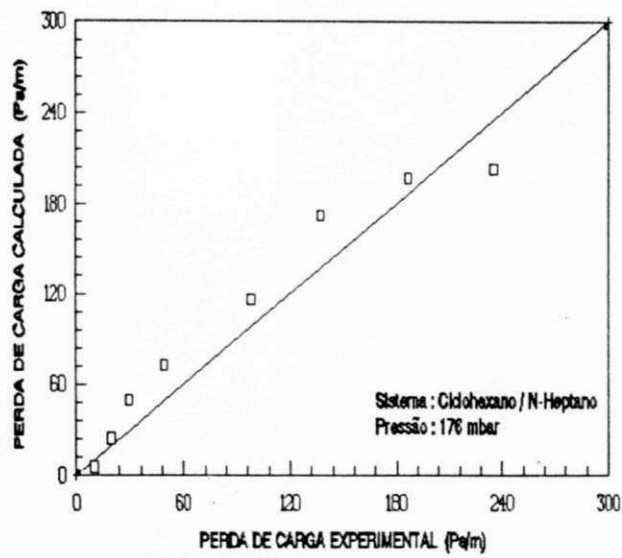


Figura 4.32 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.2.

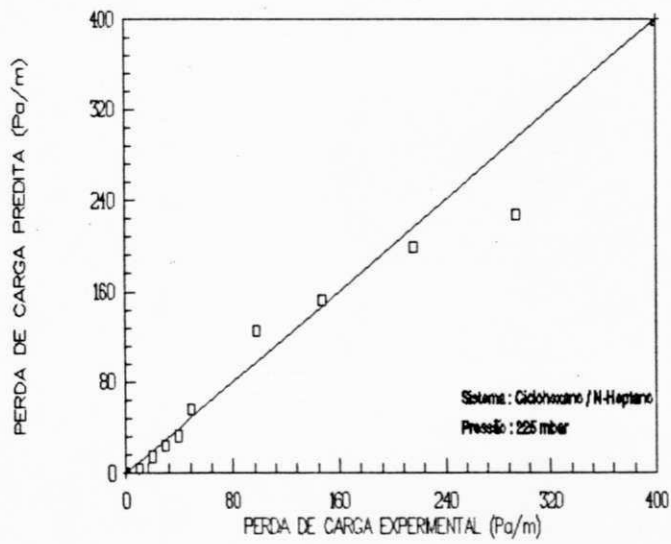


Figura 4.33 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.2.

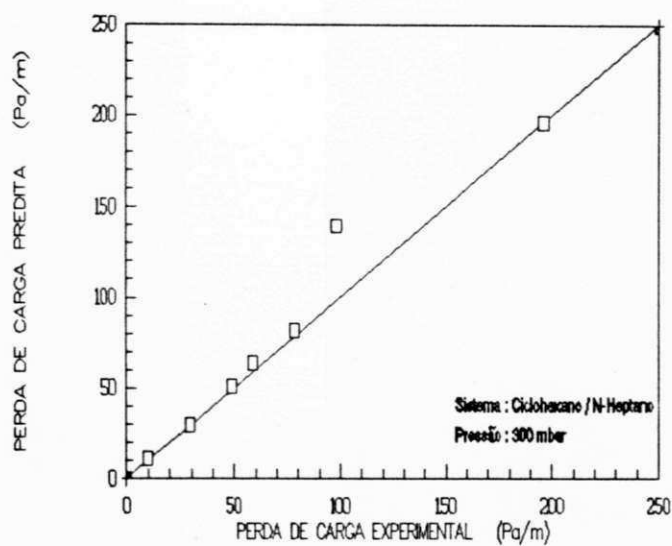


Figura 4.34 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.2.

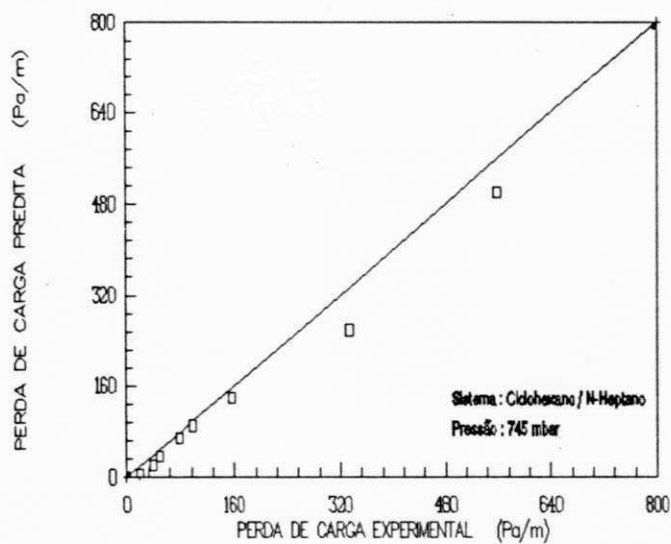


Figura 4.35 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.2.

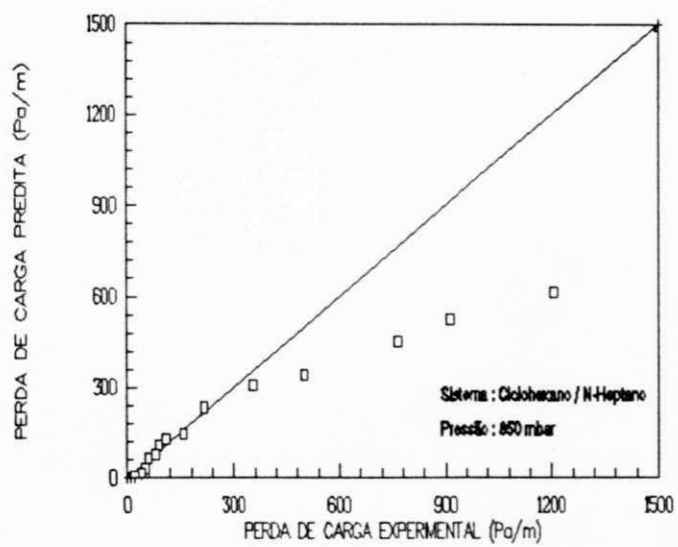


Figura 4.36 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.2.

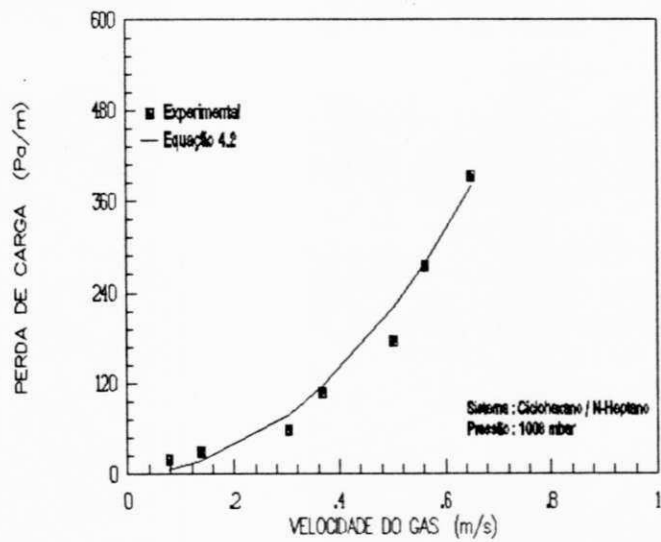


Figura 4.37 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.



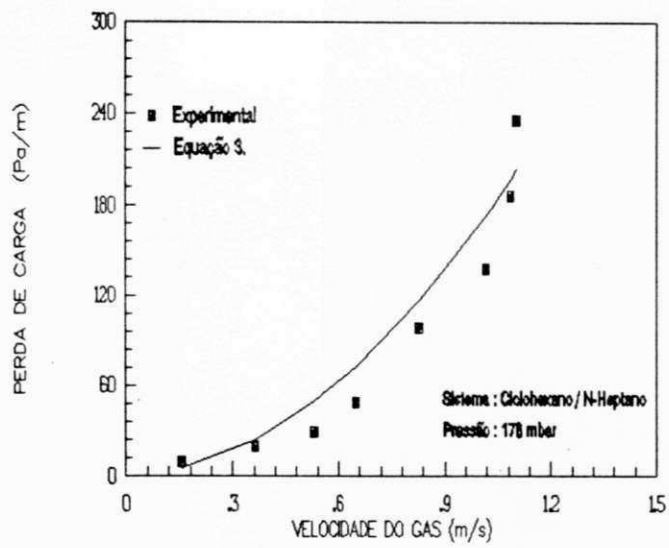


Figura 4.38 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

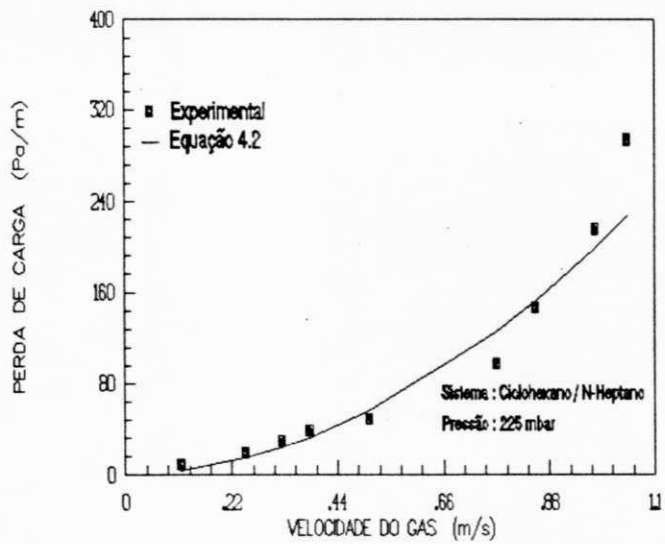


Figura 4.39 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

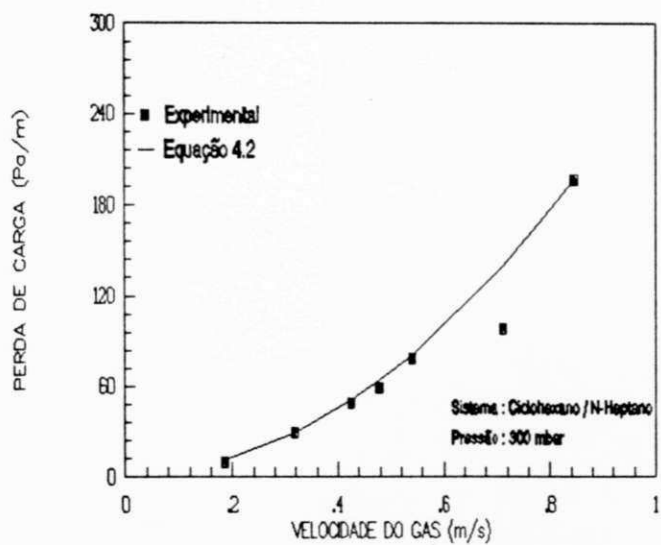


Figura 4.40 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

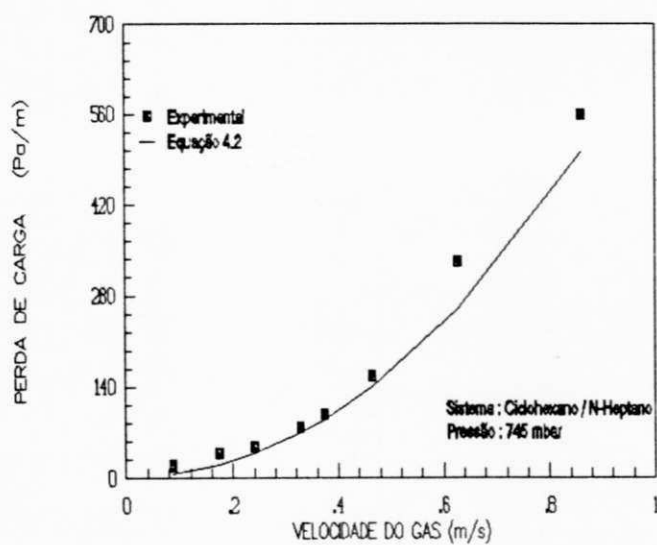


Figura 4.41 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

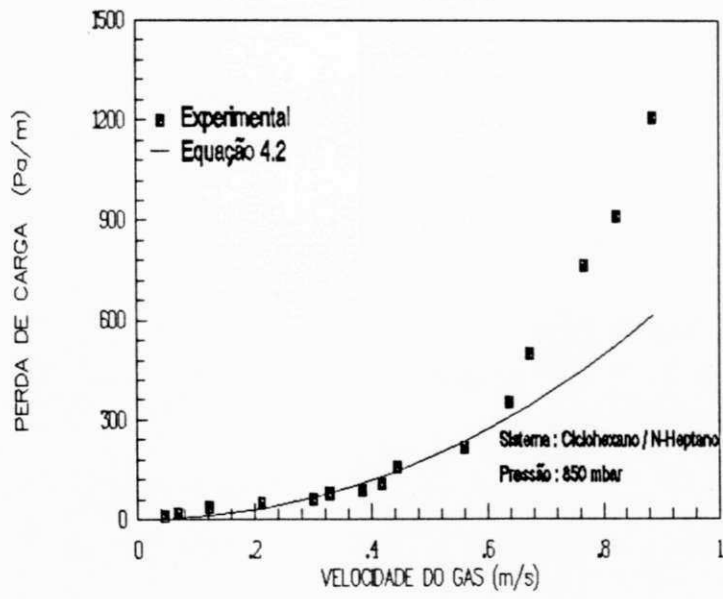


Figura 4.42 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

#### 4.5.1.2 Equação de Stichlmair

Neste modelo obteve-se através de um programa elaborado para o ajuste, as constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  do recheio estudado. Estas constantes são características de cada enchimento e são utilizadas para o cálculo do fator de fricção  $f_0$  da partícula no leito de recheio, veja § 2.4. O  $f_0$  é dado como,

$$f_0 = C_1/Re_0 + C_2/Re_0^{1/2} + C_3 \quad (2.12)$$

obteve-se desta maneira, três constantes do recheio **KERAPACK** que são:  $C_1=25.0$ ,  $C_2=2.15$  e  $C_3=1.0$ . Estas constantes são usadas para o cálculo do  $\Delta p_d$ . Uma vez obtidas as constantes, usando a equação de **Stichlmair et alii**, equação 2.8, calcula-se a perda de carga preditiva. Comparando os resultados desta equação, com as constantes obtidas pelo programa de ajuste elaborado para este fim, com os resultados experimentais observa-se que houve um ajuste relativamente bom desta equação, figuras 4.43 a 4.48. Nas tabelas 4.33 a 4.38 são mostrados os resultados e nas figuras 4.49 a 4.54 mostram-se o comportamento da perda de carga em função da velocidade do gás.

Tabela 4.33. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 2.8.

TESTE Nº 01				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 1008 mbar			TEMP. TOPO : 80,3°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$7,79700 \times 10^{-2}$	19,61808	6,57812	-66,46910
2	0,13861	29,42712	19,48935	-33,77080
3	0,30352	58,85424	95,36198	62,03078
4	0,36856	107,89945	144,14640	33,59321
5	0,50247	176,56273	283,78230	60,72606
6	0,56306	274,65314	366,65310	33,27036
7	0,64956	392,36162	506,29840	29,03870

Tabela 4.34. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 2.8.

TESTE Nº 02				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 176 mbar			TEMP. TOPO : 33,1°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,15649	9,80904	6,31385	-35,63232
2	0,36350	19,61808	27,40167	39,67560
3	0,53100	29,42712	55,60727	88,96605
4	0,65034	49,04520	82,12050	67,43839
5	0,82872	98,09041	132,26490	34,83973
6	1,01641	137,32657	199,40120	45,20217
7	1,08662	186,37180	228,40350	22,55263
8	1,10361	235,41697	235,83130	0,17600

Tabela 4.35. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 2.8.

TESTE Nº 03				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 225 mbar			TEMP. TOPO : 38,6°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,11427	9,80904	4,40256	-55,11730
2	0,24770	19,61808	16,55628	-15,60706
3	0,32269	29,42712	26,82076	-8,85700
4	0,38124	39,23616	36,62581	-6,65291
5	0,50607	49,04520	63,00707	28,46734
6	0,76932	98,09041	144,12690	46,93271
7	0,85094	147,13561	176,71750	20,10518
8	0,97452	215,79889	233,27500	8,09832
9	1,04189	294,27122	267,81870	-8,98915
10	1,09157	539,49723	295,05990	-45,30836

Tabela 4.36. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 2.8.

TESTE Nº 04				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 300 mbar			TEMP. TOPO : 45,4°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,18675	9,80904	12,42344	26,65297
2	0,31867	29,42712	33,30344	13,17260
3	0,42632	49,04520	58,32770	18,92641
4	0,47817	58,84424	73,12145	24,24161
5	0,54131	78,47232	93,54132	19,20295
6	0,71205	98,09041	163,01490	66,18846
7	0,84538	196,18100	232,47820	18,50189

Tabela 4.37. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 2.8.

TESTE Nº 05				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 745 mbar			TEMP. TOPO : 70,7°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$8,81121 \times 10^{-2}$	19,61808	6,46642	-67,03845
2	0,17500	39,23616	23,37819	-40,41672
3	0,24081	49,04520	43,82604	-10,64154
4	0,32861	78,47232	82,57900	5,23329
5	0,37467	98,09041	108,27550	10,38337
6	0,46458	156,94465	170,59030	8,69458
7	0,62733	333,50738	327,83440	-1,70102
8	0,85975	559,11530	666,28080	19,16698

Tabela 4.38. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos da equação 2.8.

TESTE Nº 06				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 850 mbar			TEMP. TOPO : 75,2°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$4,62355 \times 10^{-2}$	9,80904	2,31582	-76,39101
2	$6,78917 \times 10^{-2}$	19,61808	4,49226	-77,10145
3	0,12148	39,23616	13,03007	-66,79066
4	0,21171	49,04520	38,37595	-21,75391
5	0,30002	58,85424	78,01023	32,54818
6	0,32767	78,47232	93,75264	19,47224
7	0,38407	88,28136	131,01660	48,40804
8	0,41809	107,89945	156,98820	45,49489
9	0,44433	156,94465	178,88380	13,97889

Continuação da tabela 4.38.

corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
10	0,56107	215,79889	297,64100	37,92519
11	0,63909	353,12546	397,74390	12,63529
12	0,67453	500,26107	448,26110	-10,27375
13	0,76730	765,10516	601,76440	-21,34880
14	0,82406	912,24077	709,08670	-22,26979
15	0,88669	1206,5120	840,19340	-30,36179

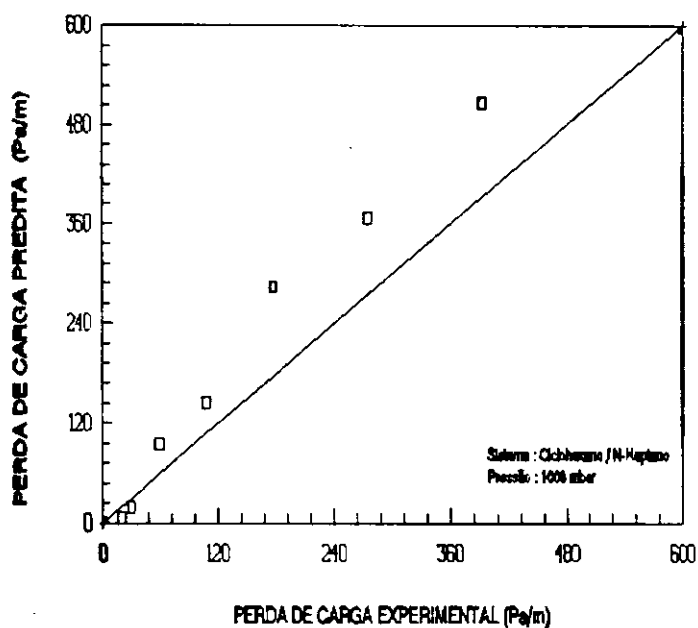


Figura 4.43 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8 com as constantes da equação 2.9 obtidas empiricamente.



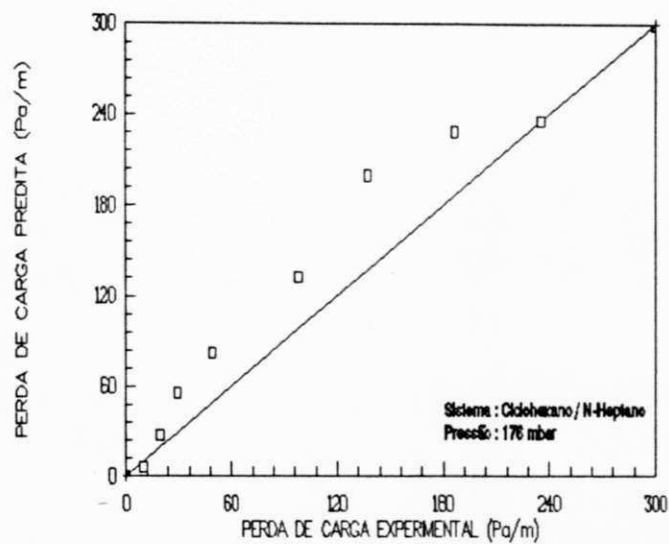


Figura 4.44 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8 com as constantes da equação 2.9 obtidas empiricamente.

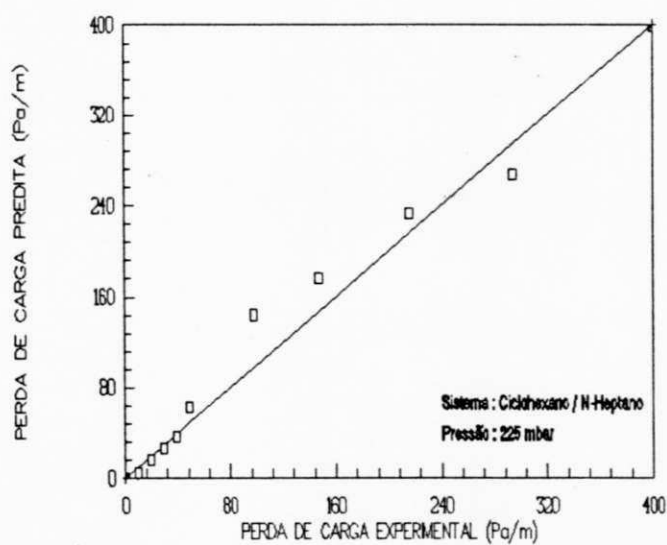


Figura 4.45 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8 com as constantes da equação 2.9 obtidas empiricamente.

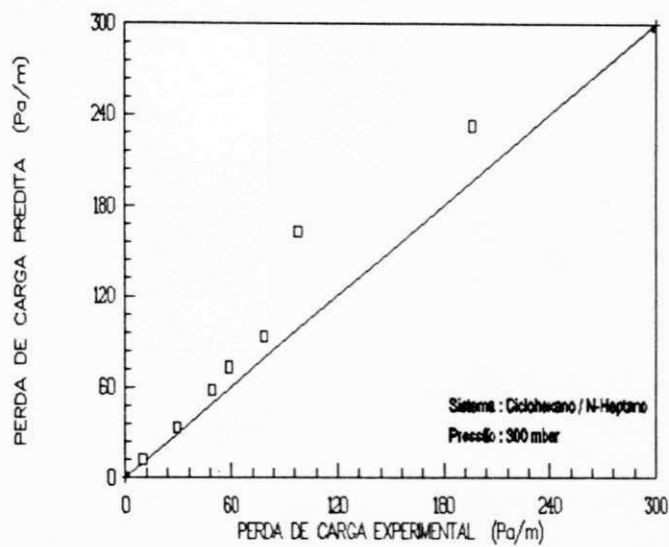


Figura 4.46 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8 com as constantes da equação 2.9 obtidas empiricamente.

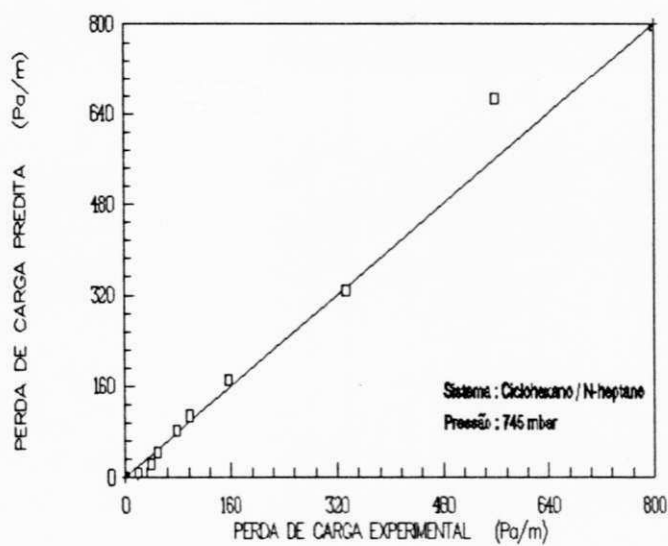


Figura 4.47 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8 com as constantes da equação 2.9 obtidas empiricamente.

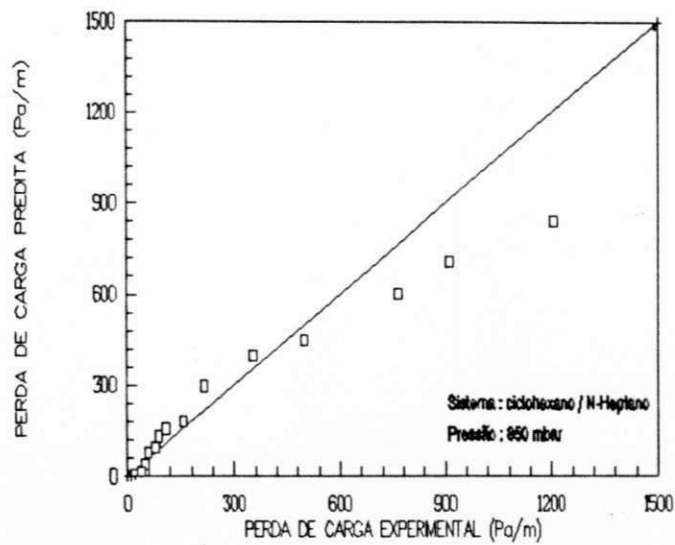


Figura 4.48 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 2.8 com as constantes da equação 2.9 obtidas empiricamente.

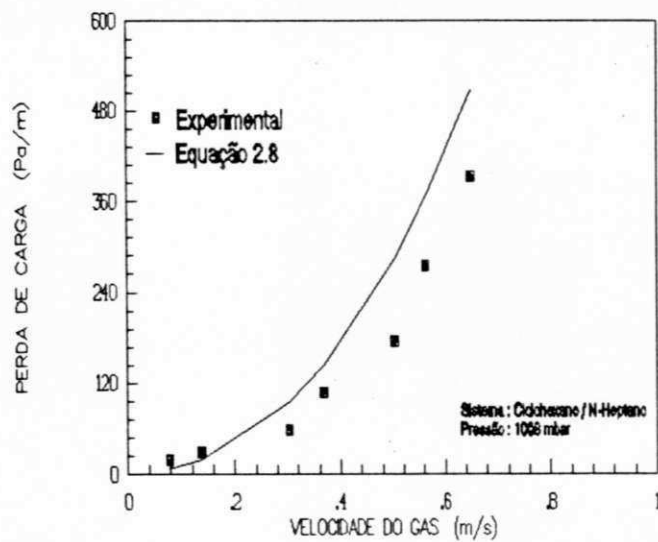


Figura 4.49 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

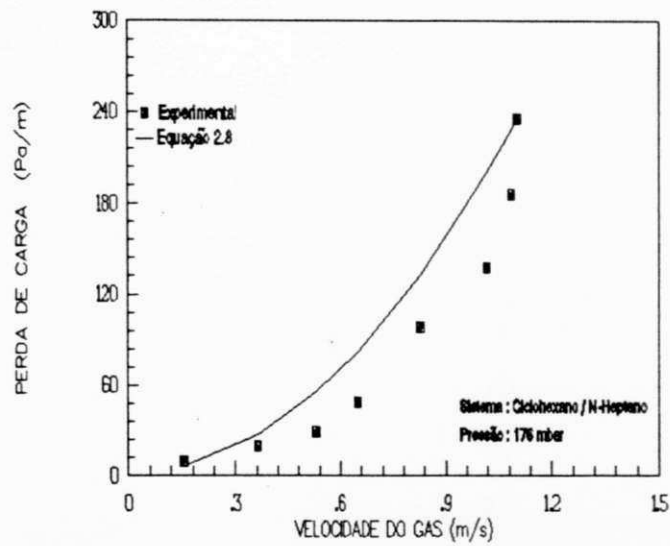


Figura 4.50 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

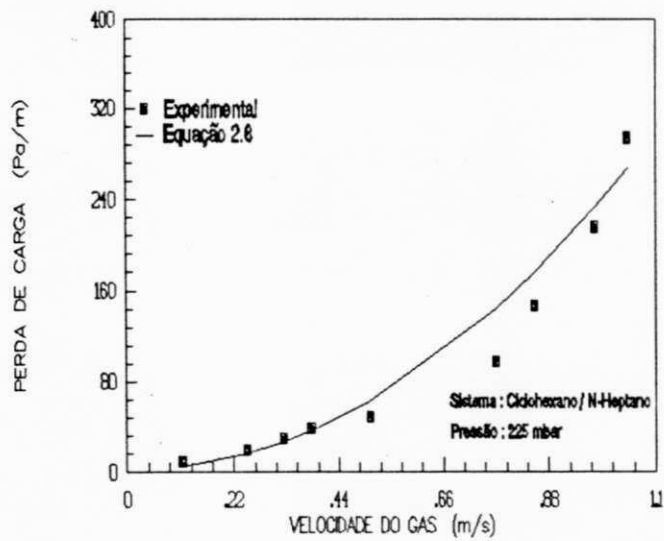


Figura 4.51 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

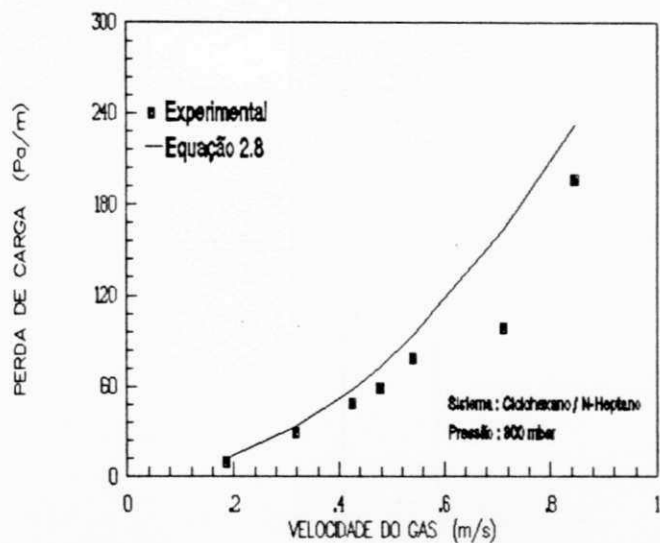


Figura 4.52 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

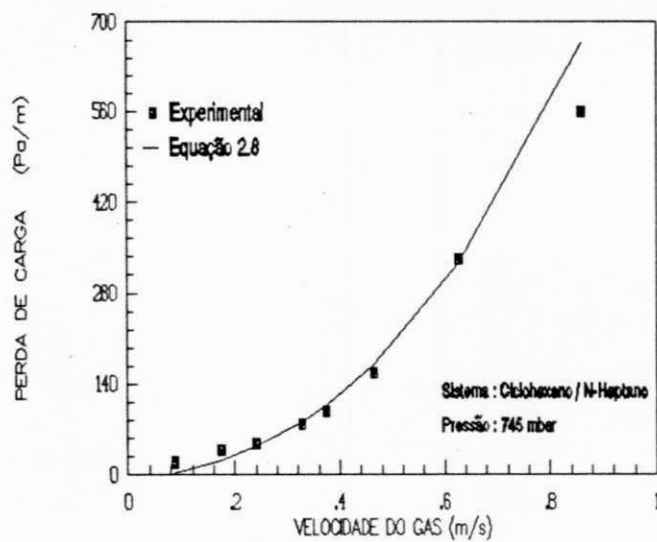


Figura 4.53 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

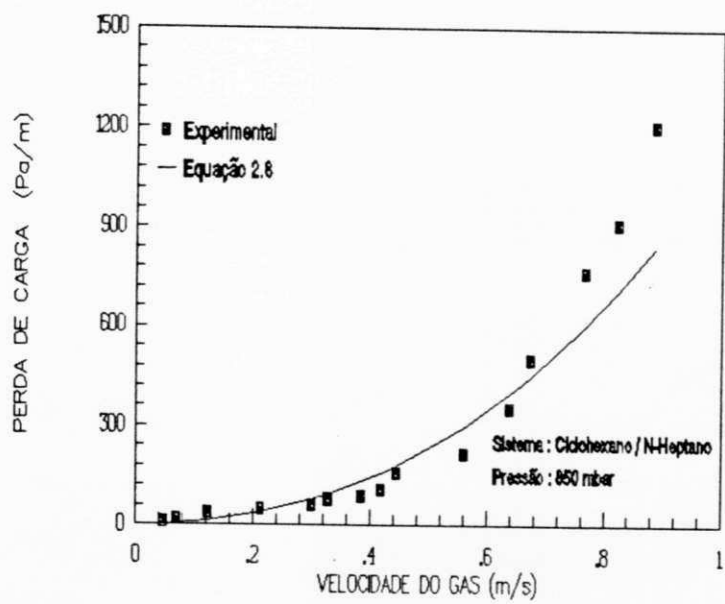


Figura 4.54 - Comportamento dos pontos experimentais e preditivos em relação a velocidade do vapor.

#### 4.5.2 Modificações Por Métodos Numéricos

Utilizando os resultados obtidos durante os experimentos tentou-se otimizar os parâmetros das equações desenvolvidas por Bravo et alii e a desenvolvida por Stichlmair et alii pela aplicação de um método numérico. Foi utilizado o **SIMPLEX**, (Nelder and Mead, 1965, Jurs, Peter C., 1987). Ao se utilizar o Simplex com os dados experimentais de todas pressões utilizadas durante os testes, não foi obtido um resultado satisfatório. Resolveu-se então separar os dados em dois grupos. No primeiro reuniu-se os dados experimentais das pressões de 176, 225 e 300 mbar, no segundo os dados das pressões de 745, 850 e 1008 mbar. Este procedimento foi tomado com a intenção de que ao se trabalhar com faixas de pressões próximas, obter uma melhor resposta para a otimização, o que de certo modo foi conseguido. Não existiu em nenhum momento a intenção de se atribuir a influência da pressão sobre as constantes características do recheio em estudo.

##### 4.5.2.1 Equação de Bravo

Partindo da equação 2.2 de Bravo et alii obteve-se duas equações, a equação 4.3 para faixas de pressões de 176 a 300 mbar,

onde o valor da constante  $C_3$  é de 42.6. Nas tabelas 4.39 a 4.41

$$\frac{\Delta P}{l} = \left[ -0.4566 + \left( \frac{108.6}{Re_g} \right) \right] \left( \rho_g \frac{Ue_g^2}{S} \right) \left[ \frac{1}{1 - C_3 F_{rl}^{0.5}} \right]^5 \quad (4.3)$$

são mostrados os resultados da aplicação desta equação. Nas figuras 4.55 a 4.57 mostram-se as comparações entre os pontos experimentais e o modelo preditivo. A equação 4.4 é válida para faixas de pressões de 745 a 1008 mbar.

$$\frac{\Delta P}{l} = \left[ -0.04502 + \left( \frac{593.0}{Re_g} \right) \right] \left[ \frac{1}{1 - C_3 F_{rl}^{0.5}} \right]^5 \quad (4.4)$$

Para a constante  $C_3$ , obteve-se o valor de 42.73. Nas tabelas 4.42 a 4.44 estão os resultados da equação 4.4. Nas figuras 4.58 a 4.60 são mostradas as comparações entre os pontos experimentais e os pontos obtidos com esta equação.

Comparando os resultados das equações 4.3 e 4.4 com os pontos experimentais, conclui-se que houve um ajuste relativamente bom destas equações. As figuras 4.61 a 4.66 mostram o comportamento da perda da carga em função da velocidade do vapor para toda a faixa de pressão usada durante os ensaios.



**Tabela 4.39. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 4.3**

TESTE Nº 02				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 176 mbar			TEMP. TOPO : 33,1°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,15649	9,80904	4,52847	-53,83372
2	0,36350	19,61808	18,42051	-6,10441
3	0,53100	29,42712	38,23378	29,92702
4	0,65034	49,04520	58,26514	18,79885
5	0,82872	98,09041	99,70424	1,645248
6	1,01641	137,32657	162,11220	18,04867
7	1,08662	186,37180	191,41220	2,704514
8	1,10361	235,41697	199,18160	-15,39202

**Tabela 4.40. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos com a equação 4.3.**

TESTE Nº 03				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 225 mbar			TEMP. TOPO : 38,6°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,11427	9,80904	3,20441	-67,33209
2	0,24770	19,61808	11,18496	-42,98645
3	0,32269	29,42712	18,12735	-38,39918
4	0,38124	39,23616	25,00480	-36,27105
5	0,50607	49,04520	44,70893	-8,84139
6	0,76932	98,09041	115,32640	17,57148
7	0,85094	147,13561	147,71930	0,39671
8	0,97452	215,79889	209,26090	-3,02968

9	1,04189	294,27122	250,12980	-15,00024
10	1,09157	539,49723	284,14380	-47,33176

**Tabela 4.41 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos com a equação 4.3.**

TESTE Nº 04				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 300 mbar		TEMP. TOPO : 45,4 °C		
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,18675	9,80904	8,42933	-14,06574
2	0,31867	29,42712	23,02606	-21,75227
3	0,42632	49,04520	42,36977	-13,61077
4	0,47817	58,84424	54,72714	-7,01242
5	0,54131	78,47232	72,82893	-7,19157
6	0,71205	98,09041	143,34360	46,13418
7	0,84538	196,18100	227,25390	15,83890

**Tabela 4.42. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos com a equação 4.4.**

TESTE Nº 05				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 745 mbar		TEMP. TOPO : 70,7°C		
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$8,81121 \times 10^{-2}$	19,61808	9,84827	-49,80006
2	0,17500	39,23616	23,40443	-40,34985
3	0,24081	49,04520	37,12229	-24,31004
4	0,32861	78,47232	61,71281	-21,35723
5	0,37467	98,09041	78,25206	-20,22455
6	0,46458	156,94465	120,54530	-23,19249
7	0,62733	333,50738	249,20270	-25,27820
8	0,85975	559,11530	684,44830	22,41631

Tabela 4.43. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos com a equação 4.4.

TESTE Nº 06				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 850 mbar			TEMP. TOPO : 75,2°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$4,62355 \times 10^{-2}$	9,80904	4,85596	-50,49510
2	$6,78917 \times 10^{-2}$	19,61808	7,50657	-61,73647
3	0,12148	39,23616	15,23316	-61,17572
4	0,21171	49,04520	33,08239	-32,54274
5	0,30002	58,85424	58,79528	-0,10019
6	0,32767	78,47232	69,13658	-11,89687
7	0,38407	88,28136	94,56156	7,11385
8	0,41809	107,89945	113,28080	4,98732
9	0,44433	156,94465	129,79660	-17,29786
10	0,56107	215,79889	233,29730	8,10861
11	0,63909	353,12546	342,44970	-3,02323
12	0,67453	500,26107	407,10190	-18,62212
13	0,76730	765,10516	645,47370	-15,63595
14	0,82406	912,24077	860,34810	-5,68848
15	0,88669	1206,5120	1188,7480	-1,47234

Tabela 4.44. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados da equação 4.4.

TESTE Nº 01				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 1008 mbar			TEMP. TOPO : 80,3°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$7,79700 \times 10^{-2}$	19,61808	9,26365	-52,78005
2	0,13861	29,42712	19,55597	-33,54440
3	0,30352	58,85424	70,82753	20,34397
4	0,36856	107,89945	106,77620	-1,04100
5	0,50247	176,56273	236,14040	33,74305
6	0,56306	274,65314	335,60210	22,19124
7	0,64956	392,36162	557,44610	42,07457

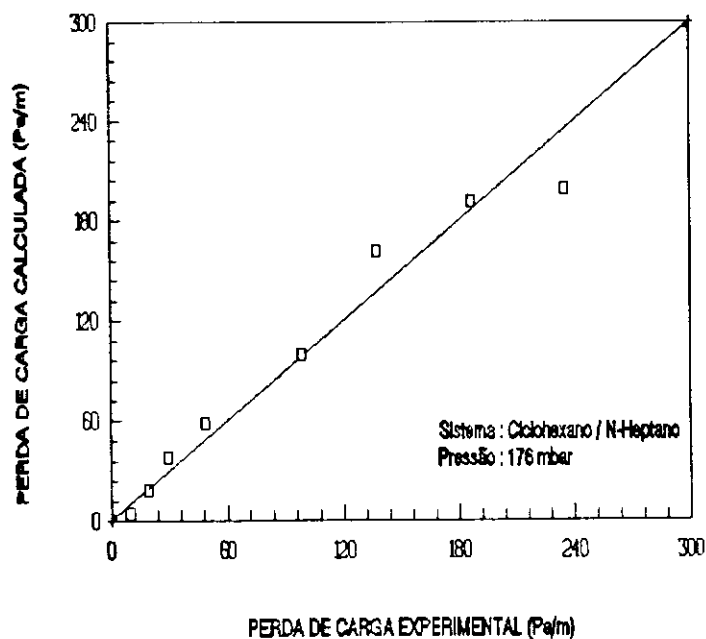


Figura 4.55 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.3.

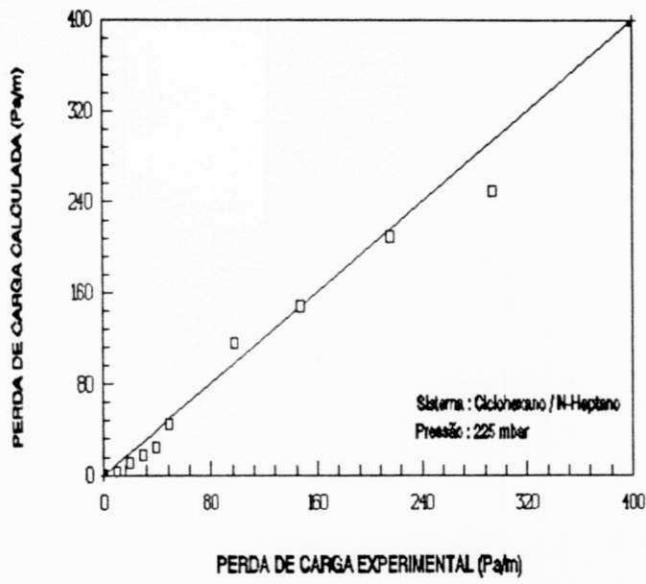


Figura 4.56 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.3.

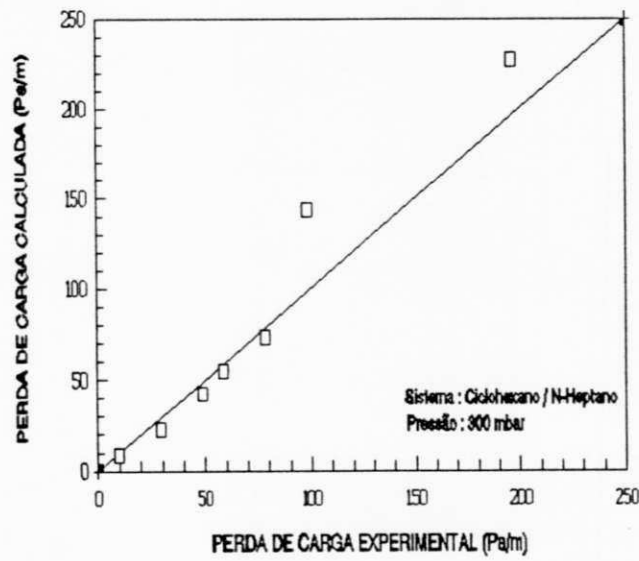


Figura 4.57 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.3.

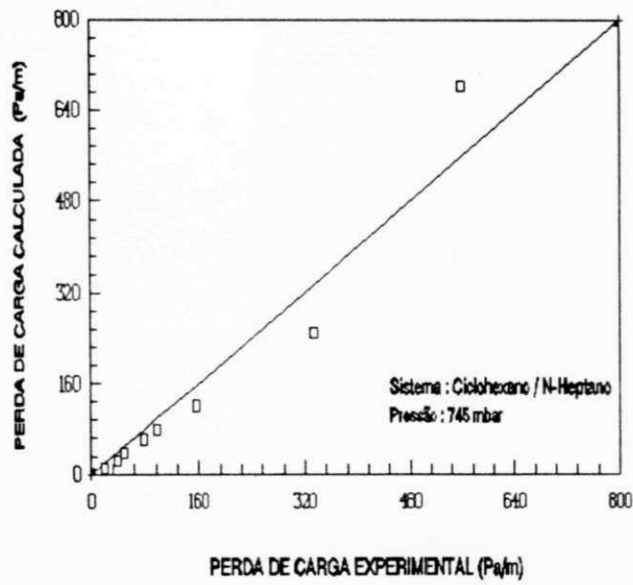


Figura 4.58 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.4.

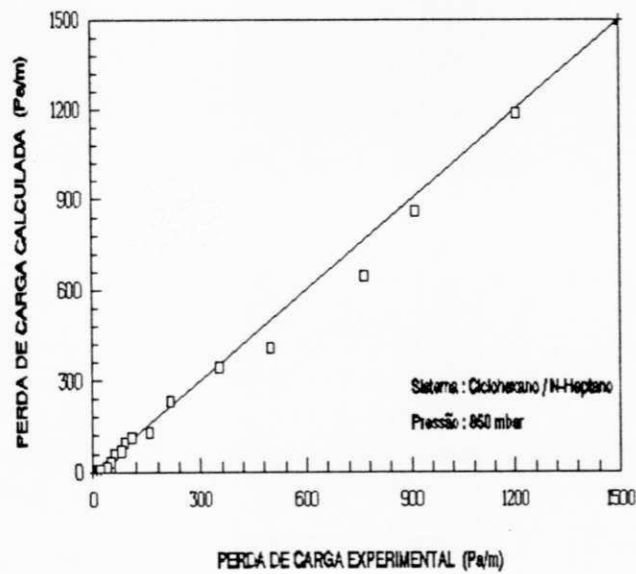


Figura 4.59 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.4.

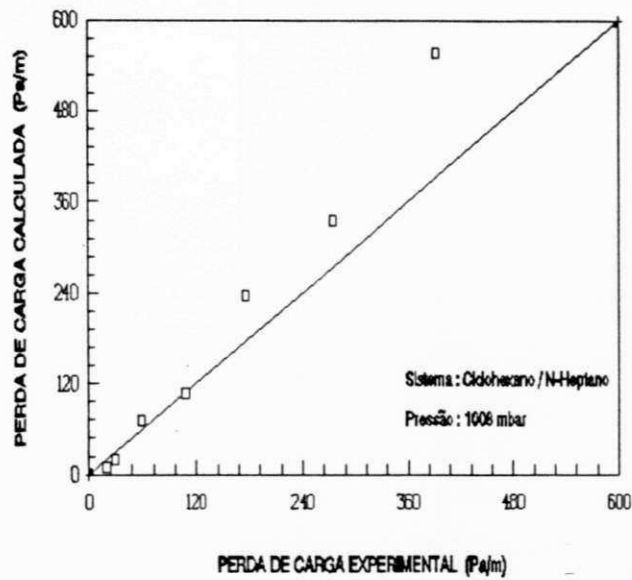


Figura 4.60 - Comparação dos pontos experimentais com os pontos obtidos pela equação 4.4.

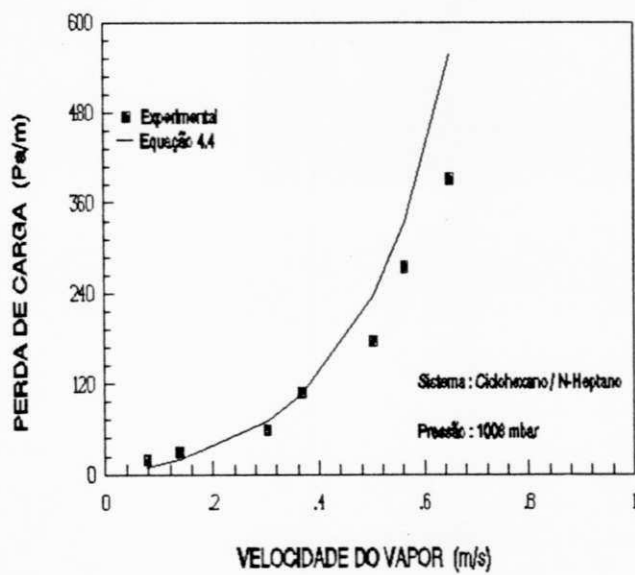


Figura 4.61 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor.

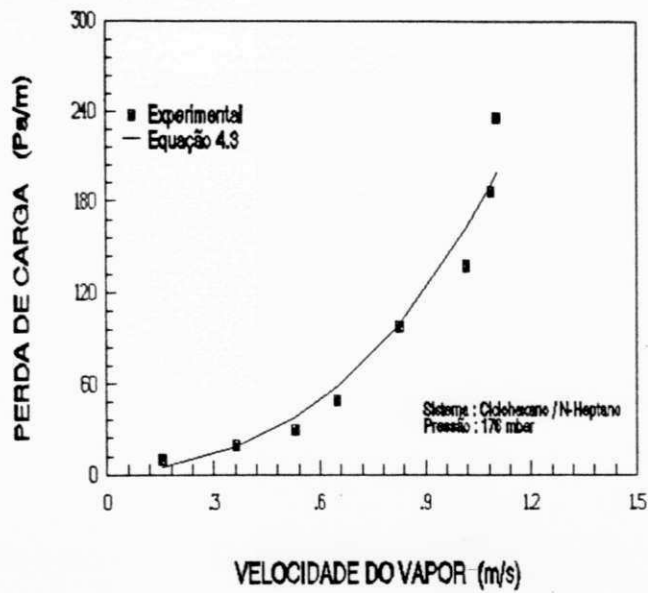


Figura 4.62 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor.

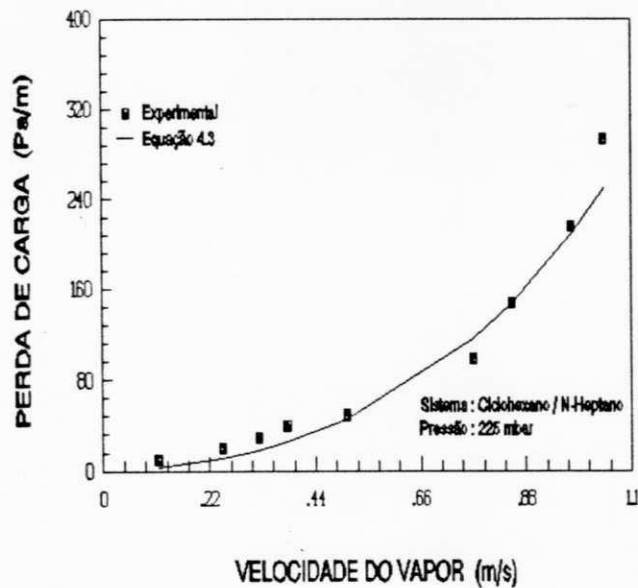


Figura 4.63 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor.



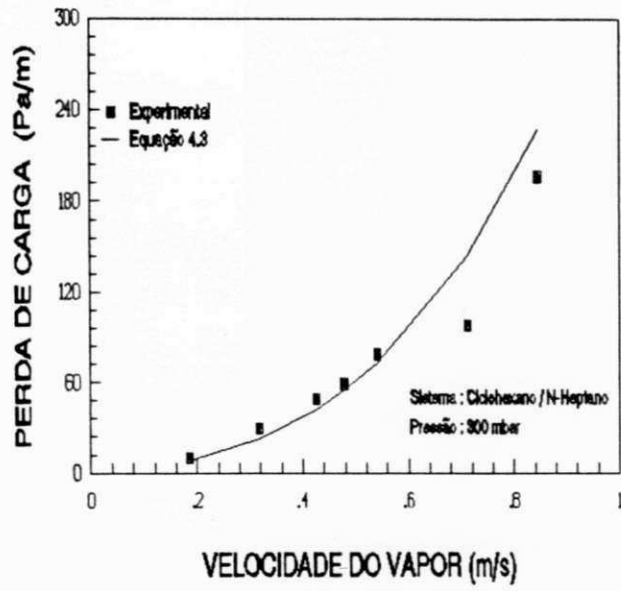


Figura 4.64 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor.

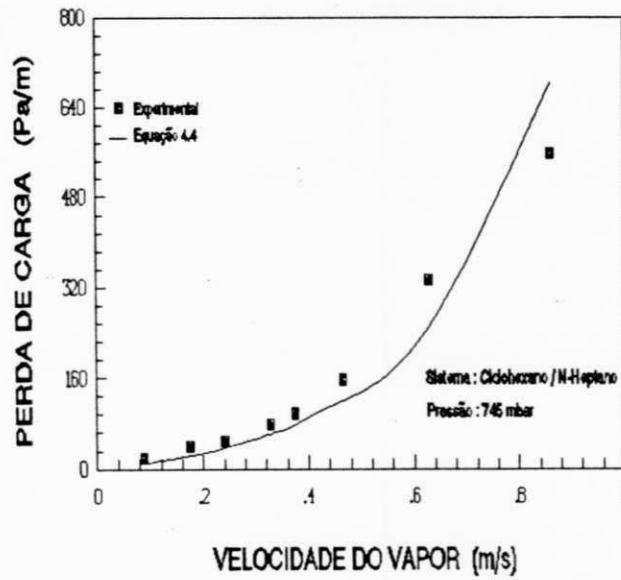


Figura 4.65 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor.

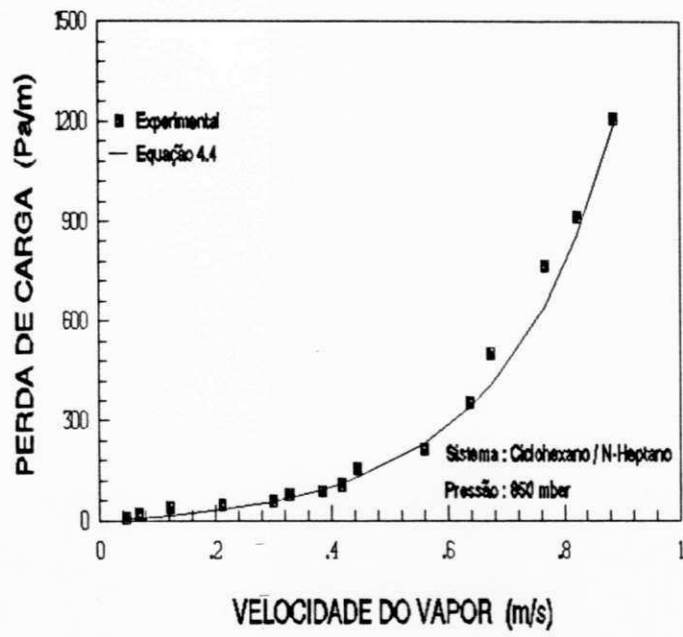


Figura 4.66 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor.

#### 4.5.2.2 Equação de Stichlmair

Foi Usado o mesmo procedimento descrito no § 4.5.2.1 para que, com o uso do SIMPLEX fosse possível obter as constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  próprias para o recheio KERAPACK. Assim, dentro da faixa de pressão utilizada durante os ensaios, para pressões de 176 a 300 mbar foram obtidas as seguintes constantes características do recheio:

$$C_1=324.9 : C_2=-54.69 : C_3=3.138$$

desta maneira usando estas constantes na equação 2.12 e daí calculando o  $\Delta p_d$ , equação 2.9, veja § 2.4, pode-se calcular a perda de carga através da equação 2.8. Nas tabelas 4.45 a 4.47 estão os resultados obtidos e nas figuras 4.67 a 4.69 tem-se a comparação da perda de carga experimental com a perda de carga calculada com a equação 2.8 com as constantes do recheio otimizadas. Para as faixas de pressões de 745 a 1008 mbar encontrou-se os seguintes valores para as constantes:

$$C_1=166.0 : C_2=0.6642 : C_3=0.6946$$

como no § anterior, usando estas constantes na equação 2.12 e calculando o  $\Delta p_d$  com a equação 2.9, utiliza-se a equação 2.8 para o cálculo da perda de carga. Nas tabelas 4.48 a 4.50 estão os resultados do uso destas equações com as constantes otimizadas, as figuras 4.70 a 4.72 mostram a comparação dos resultados experimentais com os resultados que foram obtidos através do uso da equação 2.8 utilizando as constantes próprias para o recheio Kerapack. Percebe-se que houve um bom ajuste destas constantes. As figuras 4.73 a 4.78 mostram o comportamento da perda de carga em relação a velocidade do vapor.

Tabela 4.45. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos com a equação 2.8.

TESTE Nº 02				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 176 mbar			TEMP. TOPO : 33,1°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,15649	9,80904	7,89646	-19,49817
2	0,36350	19,61808	17,20269	-12,31205
3	0,53100	29,42712	34,48146	17,17579
4	0,65034	49,04520	54,63791	11,40316
5	0,82872	98,09041	99,68025	1,62079
6	1,01641	137,32657	169,56670	23,47697
7	1,08662	186,37180	202,16950	8,47645
8	1,10361	235,41697	210,78100	-10,46484

Tabela 4.46. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos com a equação 2.8.

TESTE Nº 03				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 225 mbar			TEMP. TOPO : 38,6°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,11427	9,80904	6,08299	-37,98592
2	0,24770	19,61808	11,25513	-42,62880
3	0,32269	29,42712	16,43810	-44,13962
4	0,38124	39,23616	22,28178	-43,21113
5	0,50607	49,04520	41,32535	-15,74027
6	0,76932	98,09041	117,96110	20,25750
7	0,85094	147,13561	153,53660	4,35039
8	0,97452	215,79889	219,75210	1,83191
9	1,04189	294,27122	262,39270	-10,83306
10	1,09157	539,49723	297,04110	-44,94114

Tabela 4.47. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos com a equação 2.8.

TESTE Nº 04				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 300 mbar			TEMP. TOPO : 45,4°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	0,18675	9,80904	8,62409	-12,08020
2	0,31867	29,42712	20,44063	-30,53813
3	0,42632	49,04520	39,50491	-19,45205
4	0,47817	58,84424	52,50320	-10,79113
5	0,54131	78,47232	71,94999	-8,31163
6	0,71205	98,09041	147,58790	50,46104
7	0,84538	196,18100	232,91830	18,72621

Tabela 4.48. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através da equação 2.8.

TESTE Nº 05				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 745 mbar			TEMP. TOPO : 70,7°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$8,81121 \times 10^{-2}$	19,61808	11,67325	-40,49749
2	0,17500	39,23616	30,98738	-21,02341
3	0,24081	49,04520	51,23720	4,46933
4	0,32861	78,47232	86,53209	10,27085
5	0,37467	98,09041	108,98350	11,10516
6	0,46458	156,94465	161,49240	2,89766
7	0,62733	333,50738	288,37460	-13,53279
8	0,85975	559,11530	550,85860	-1,47674

**Tabela 4.49. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através da equação 2.8.**

TESTE Nº 06				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 850 mbar			TEMP. TOPO : 75,2°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$4,62355 \times 10^{-2}$	9,80904	5,34699	-45,48918
2	$6,78917 \times 10^{-2}$	19,61808	8,68616	-55,72371
3	0,12148	39,23616	19,27638	-50,87087
4	0,21171	49,04520	45,17876	-7,88342
5	0,30002	58,85424	81,31479	38,16301
6	0,32767	78,47232	95,02991	21,09992
7	0,38407	88,28136	126,73050	43,55297
8	0,41809	107,89945	148,37500	37,51228
9	0,44433	156,94465	166,40930	6,03058
10	0,56107	215,79889	261,91320	21,36909
11	0,63909	353,12546	340,56060	-3,55820
12	0,67453	500,26107	380,33280	-23,97313
13	0,76730	765,10516	497,98760	-34,91253
14	0,82406	912,24077	579,78000	-36,44442
15	0,88669	1206,5120	679,05000	-43,71793

Tabela 4.50. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos com a equação 2.8.

TESTE Nº 01				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 1008 mbar			TEMP. TOPO : 80,3°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	$\Delta p/l_{(exp)}$ (Pa/m)	$\Delta p/l_{(cal)}$ (Pa/m)	ERRO (%)
1	$7,79700 \times 10^{-2}$	19,61808	11,14195	-43,20573
2	0,13861	29,42712	25,62234	-12,92951
3	0,30352	58,85424	94,70209	60,90955
4	0,36856	107,89945	135,57320	25,64770
5	0,50247	176,56273	247,84410	40,37167
6	0,56306	274,65314	312,92470	13,93450
7	0,64956	392,36162	420,56710	7,188635

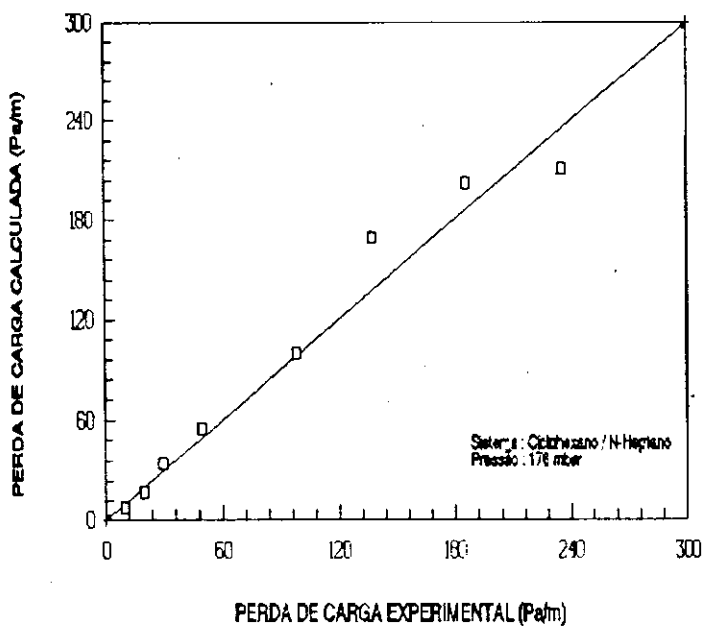


Figura 4.67 - Comparação entre os pontos experimentais e os pontos obtidos com a equação 2.8 usando as constantes obtidas no SIMPLEX na equação 2.9.

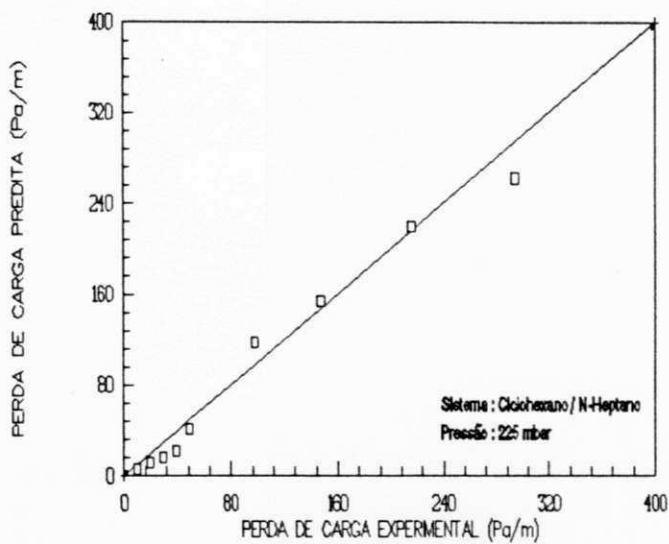


Figura 4.68 - Comparação entre os pontos experimentais e os pontos obtidos com a equação 2.8 usando as constantes obtidas no simplex na equação 2.9.

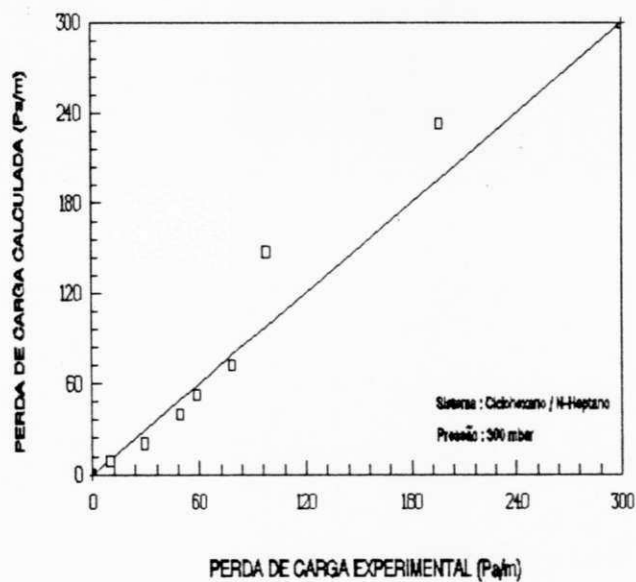


Figura 4.69 - Comparação entre os pontos experimentais e os pontos obtidos com a equação 2.8 usando as constantes obtidas no simplex na equação 2.9.



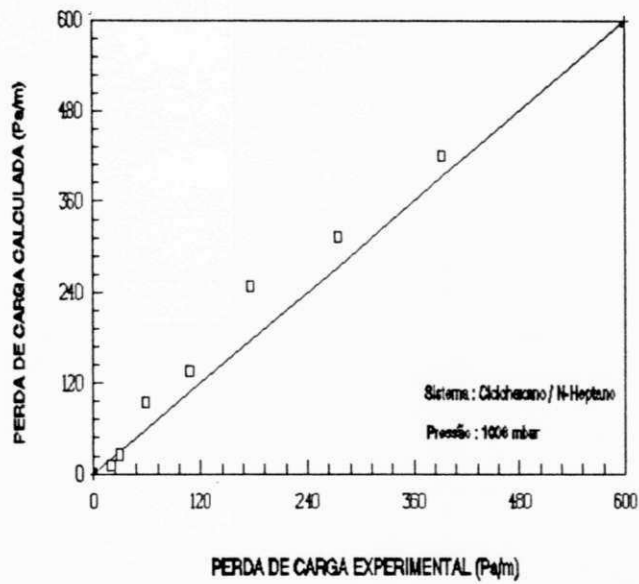


Figura 4.70 - Comparação entre os pontos experimentais e os pontos obtidos com a equação 2.8 usando as constantes obtidas no simplex na equação 2.9.

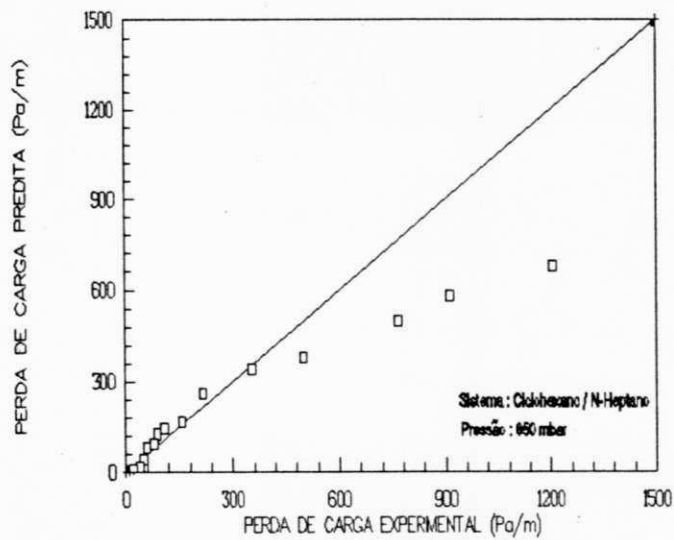


Figura 4.71 - Comparação entre os pontos experimentais e os pontos obtidos com a equação 2.8 usando as constantes obtidas no simplex na equação 2.9.

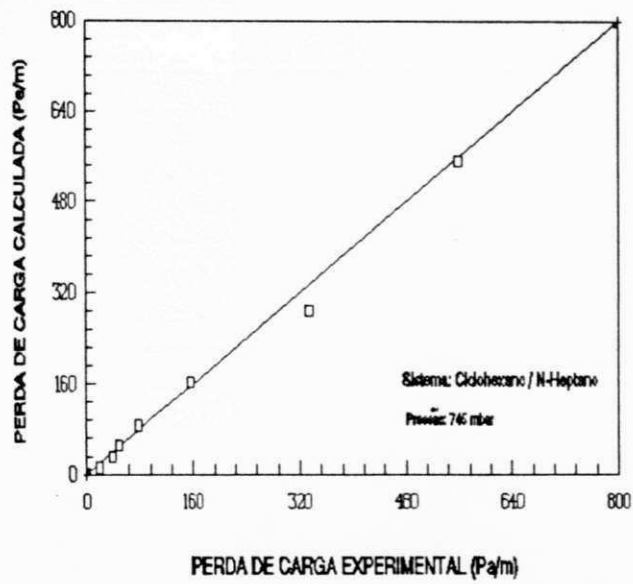


Figura 4.72 - Comparação entre os pontos experimentais e os pontos obtidos com a equação 2.8 usando as constantes obtidas no simplex na equação 2.9.

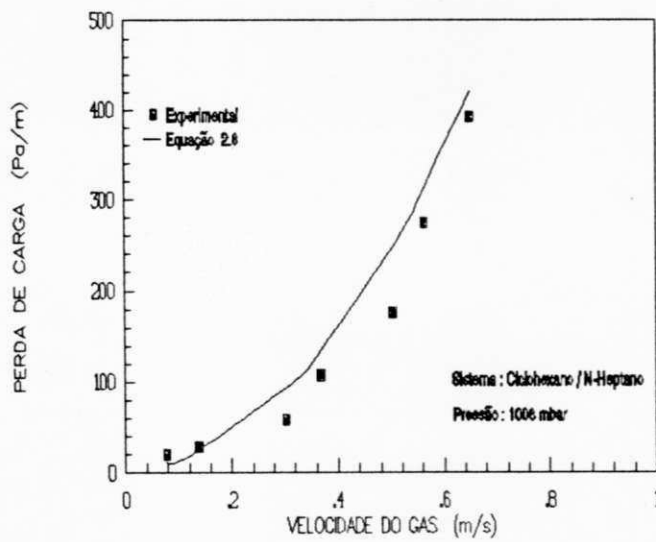


Figura 4.73 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor, tendo as constantes da equação 2.9 sido obtidas pelo simplex.

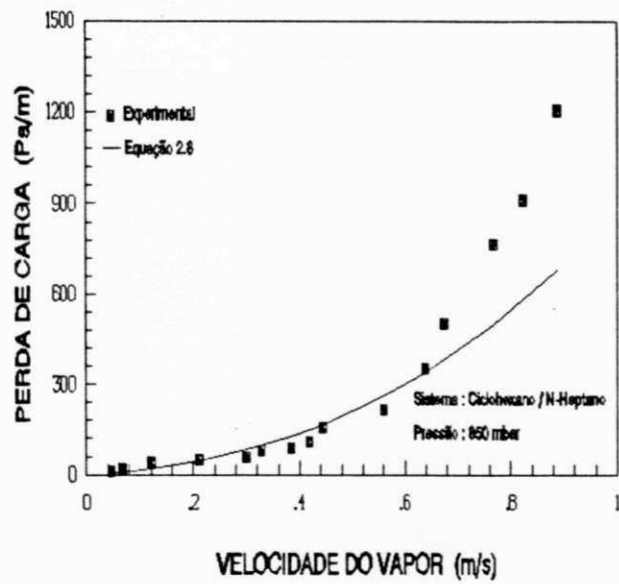


Figura 4.74 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor, tendo as constantes da equação 2.9 sido obtidas pelo simplex.

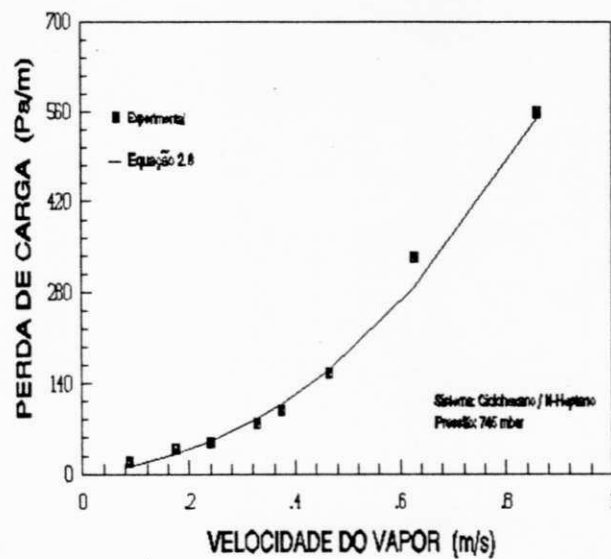


Figura 4.75 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor, tendo as constantes da equação 2.9 sido obtidas pelo simplex.

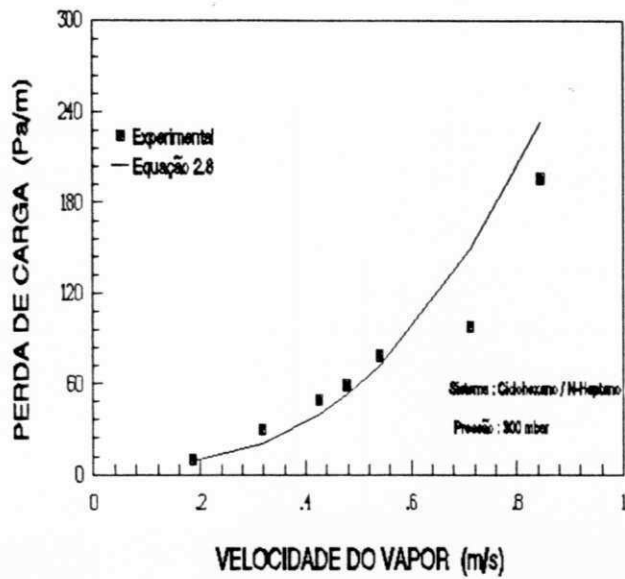


Figura 4.76 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor, tendo as constantes da equação 2.9 sido obtidas pelo simplex.

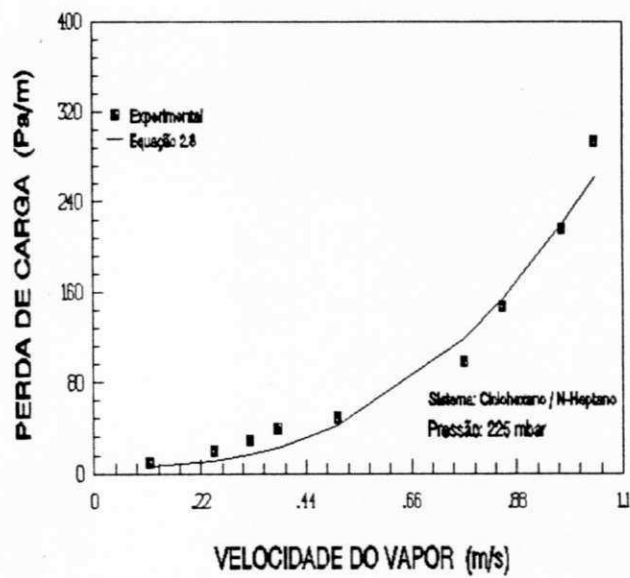


Figura 4.77 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor, tendo as constantes da equação 2.9 sido obtidas pelo simplex.

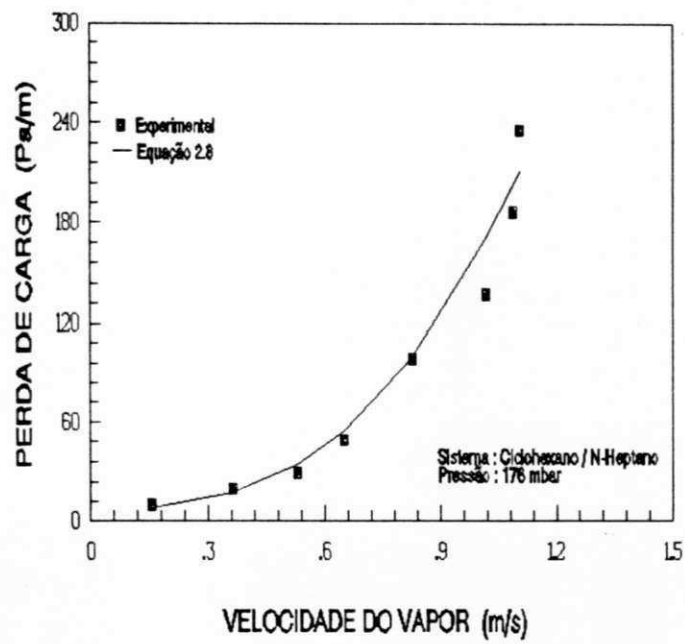


Figura 4.78 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação a velocidade do vapor, tendo as constantes da equação 2.9 sido obtidas pelo simplex.

#### 4.6 Modificação do Modelo Preditivo da Eficiência

Objetivando um melhor ajuste do modelo preditivo em relação aos pontos experimentais foi proposta uma modificação na equação 2.16, veja § 2.5.

$$N_{sh} = 0.0338 (N_{Re})^{0.8} (N_{Sc})^{0.333} \quad (2.16)$$

Como já colocado no § 4.5.2, para a utilização do Simplex os dados experimentais foram divididos em dois grupos. No primeiro ficaram os dados experimentais obtidos nos ensaios realizados com as pressões de 176, 225 e 300 mbar, no segundo os dados experimentais das pressões de 745, 850 e 1008 mbar.

Para o grupo constituído das pressões de 176, 225 e 300 mbar após ter utilizado o SIMPLEX foi obtida a seguinte equação,

$$N_{sh} = .1357 \times 10^{-2} (N_{Re})^{1.052} (N_{Sc})^{0.43789} \quad (4.5)$$

o HETP é então calculado pela equação 2.27,

$$HETP = H_{OG} \cdot \left[ \frac{\ln \lambda}{(\lambda - 1)} \right] \quad (2.27)$$

nas tabelas 4.51 a 4.53 mostram-se os resultados da equação 2.27 com a utilização da equação 4.5 para seu cálculo. Nas figuras 4.79 a 4.81 mostra-se que os ajustes promovidos conduziram a bons resultados.

Para o grupo das pressões de 745, 850 e 1008 mbar o Simplex obteve a seguinte expressão:

$$N_{sh} = .2370 \times 10^{-4} (N_{Re})^{1.3832} (N_{Sc})^{0.57576} \quad (4.6)$$

O HETP pode então ser calculado utilizando a equação 2.27. Nas tabelas 4.54 a 4.56 estão os resultados do cálculo do HETP que utilizou a equação 4.6 para o seu cálculo. As figuras 4.82 a 4.84 mostram um bom ajuste dos pontos preditivos com os pontos experimentais.

**Tabela 4.51 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através da equação 2.27.**

TESTE Nº 02				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 176 mbar			TEMP. TOPO : 33,1°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	0,15649	0,17801	0,21258	19,42266
2	0,36350	0,24413	0,25315	3,69216
3	0,53100	0,23487	0,27282	16,15666
4	0,65034	0,21862	0,28366	29,75532
5	0,82872	0,22658	0,29639	30,81506
6	1,01641	0,25841	0,30656	18,63167
7	1,08662	0,25752	0,31016	20,44025
8	1,10361	0,27033	0,31057	14,88461

**Tabela 4.52. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através da equação 2.27.**

TESTE Nº 03				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 225 mbar			TEMP. TOPO : 38,6°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	0,11427	0,34820	0,16632	-52,23521
2	0,24770	0,23594	0,20096	-14,82476
3	0,32269	0,25646	0,21244	-17,16544
4	0,38124	0,27007	0,21978	-18,62118
5	0,50607	0,30259	0,23185	-23,37952
6	0,76932	0,26740	0,25320	-5,31161
7	0,85094	0,24893	0,25867	3,91494
8	0,97452	0,25011	0,26559	6,19206
9	1,04189	0,24411	0,26911	10,24138
10	1,09157	0,24637	0,27140	10,16043



**Tabela 4.53. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através da equação 2.27.**

TESTE Nº 04				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 300 mbar			TEMP. TOPO : 45,4°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	0,18675	0,24117	0,15619	-35,23540
2	0,31867	0,24629	0,17674	-28,23719
3	0,42632	0,22947	0,18894	-17,66242
4	0,47817	0,24865	0,19338	-22,22761
5	0,54131	0,23275	0,19893	-14,52992
6	0,71205	0,22950	0,21097	-8,07371
7	0,84538	0,22498	0,21881	-2,74132

**Tabela 4.54. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através da equação 2.27.**

TESTE Nº 05				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 745 mbar			TEMP. TOPO : 70,7°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	$8,8112 \times 10^{-2}$	0,22369	0,25657	14,70248
2	0,17500	0,26639	0,26090	-2,06163
3	0,24081	0,23097	0,26487	14,67697
4	0,32861	0,23061	0,26690	15,73484
5	0,37467	0,21830	0,26812	22,82242
6	0,46458	0,20867	0,26934	29,07593
7	0,62733	0,24070	0,26953	11,97821
8	0,85975	0,24644	0,27044	9,73666

**Tabela 4.55. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através da equação 2.27.**

TESTE Nº 06				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 850 mbar			TEMP. TOPO : 75,2°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	4,6236 x 10 <sup>-2</sup>	0,32316	0,20634	-36,15055
2	6,7892 x 10 <sup>-2</sup>	0,28376	0,21248	-25,12202
3	0,12148	0,26830	0,21854	-18,54834
4	0,21171	0,24324	0,22428	-7,79333
5	0,30002	0,23777	0,22702	-4,52222
6	0,32767	0,24483	0,22720	-7,19925
7	0,38407	0,24703	0,22800	-7,70309
8	0,41809	0,24369	0,22863	-6,18250
9	0,44433	0,23883	0,22913	-4,05854
10	0,56107	0,23791	0,23027	-3,21116
11	0,63909	0,23527	0,23085	-1,87840
12	0,67453	0,22371	0,23146	3,46257
13	0,76730	0,22171	0,23196	4,62275
14	0,82406	0,21917	0,23231	5,99675
15	0,88669	0,20842	0,23293	11,76023

Tabela 4.56. - Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através da equação 2.27.

TESTE Nº 01				
PRESSÃO DE OPERAÇÃO : 1008 mbar			TEMP. TOPO : 80,3°C	
SISTEMA : CICLOHEXANO / N-HEPTANO				
corrida nº	vel. vapor (m/s)	HETP <sub>(exp)</sub> (m)	HETP <sub>(cal)</sub> (m)	ERRO (%)
1	$7,79700 \times 10^{-2}$	0,27483	0,17311	-37,01183
2	0,13861	0,27697	0,17919	-23,26058
3	0,30352	0,22090	0,18499	-16,25487
4	0,36856	0,21854	0,18620	-14,79628
5	0,50247	0,21723	0,18796	-13,47558
6	0,56306	0,21498	0,18866	-12,24524
7	0,64956	0,20354	0,18954	-6,88198

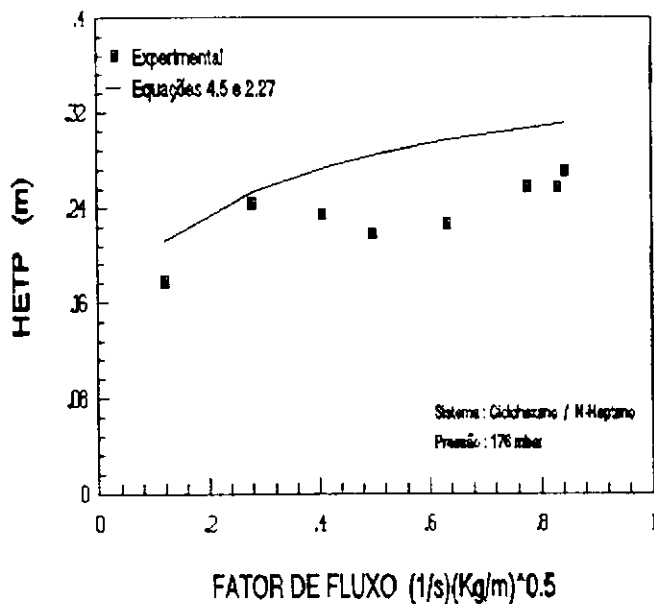


Figura 4.79 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação ao fator de fluxo.

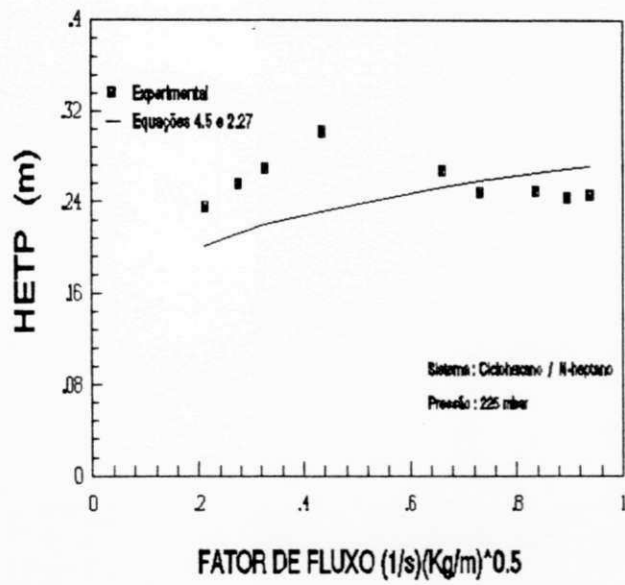


Figura 4.80 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação ao fator de fluxo.

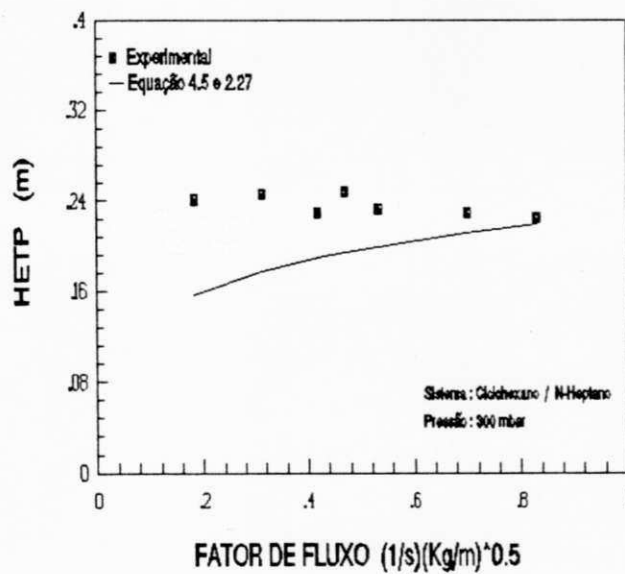


Figura 4.81 - Comportamento dos pontos experimentais e preditos em relação ao fator de fluxo.

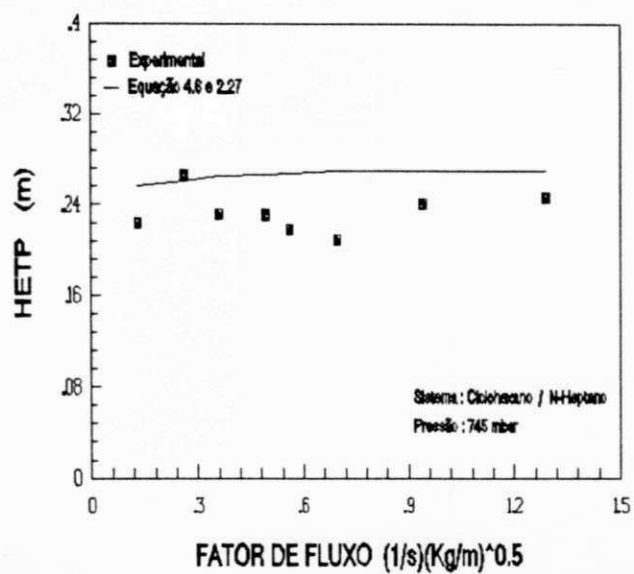


Figura 4.82 - Comparação dos pontos experimentais e preditivos em relação ao fator de fluxo.

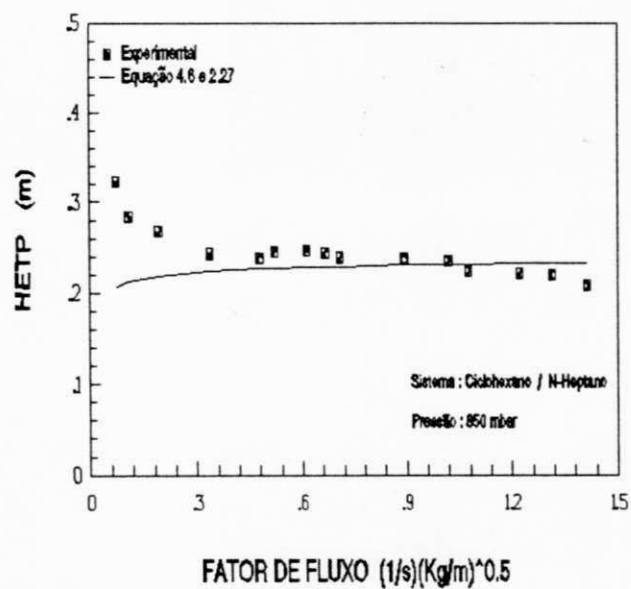


Figura 4.83 - Comparação dos pontos experimentais e preditivos em relação ao fator de fluxo.

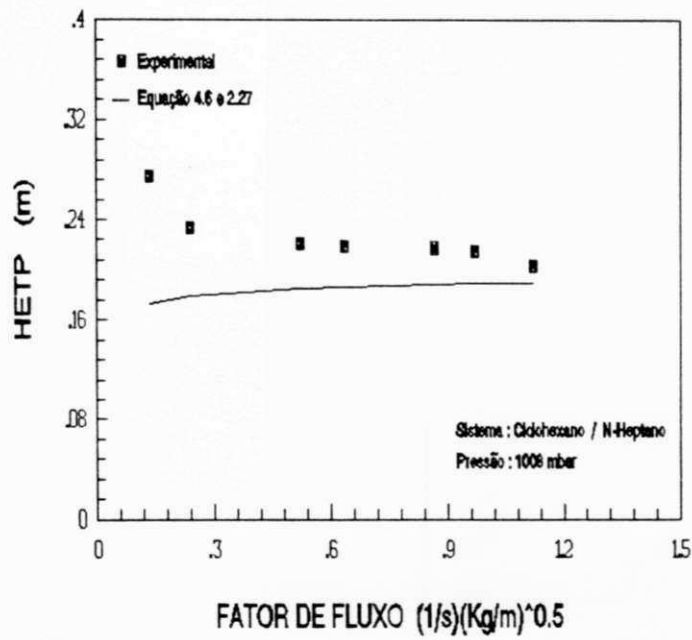


Figura 4.84 - Comparação dos pontos experimentais e preditos em relação ao fator de fluxo.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Observando os resultados obtidos neste trabalho, que destinou-se a avaliar o comportamento de uma coluna de destilação com recheio estruturado KERAPACK, quanto à perda de carga e a eficiência, chegou-se as seguintes conclusões:

#### 5.1 - EM RELAÇÃO AO RECHEIO

Conforme exposto na literatura para os recheios estruturados, para o recheio KERAPACK a perda de carga também reproduziu resultados da literatura, ou seja o KERAPACK apresentou uma baixa perda de carga e uma alta eficiência, ou seja, baixo HETP.

#### 5.2 EM RELAÇÃO ÀS EQUAÇÕES EXISTENTES NA LITERATURA

Às equações que são apresentadas na literatura para o cálculo da perda de carga e o cálculo da eficiência, não apresentaram resultados satisfatórios que pudessem representar o comportamento dos resultados experimentais. Isto decorre do fato de que estas equações não utilizaram este tipo de recheio para o

seu desenvolvimento e em conseqüência, não se dispõe de parâmetros para o recheio em estudo, necessários para a utilização das equações preditivas.

### 5.3 EM RELAÇÃO AS EQUAÇÕES DESENVOLVIDAS A PARTIR DAS EQUAÇÕES EXISTENTES NA LITERATURA PARA A PREDIÇÃO DA PERDA DE CARGA.

Desenvolveram-se equações, através de modificações das constantes das equações de Bravo et alii e a de Stichlmair et alii para a perda de carga e a de Bravo et alii para a eficiência.

Para o a equação de Bravo et alii (equação 2.2), através de um Programa Elaborado Para o Ajuste das constantes, chegou-se a seguinte expressão:

$$\Delta P = \left[ 0.94086 + \left( \frac{92.7}{Re_g} \right) \right] \left[ \frac{\rho_g U_{ge}^2}{d_{eq} g_c} \right] \left[ \frac{1}{1 - C_3 Fr^{0.5}} \right]^5 \quad (4.2)$$

Onde o valor da constante  $C_3$  foi mantida como 3,38.

Utilizando o SIMPLEX para otimizar as constantes da equação de Bravo et alii (equação 2.2), chegou-se as seguintes equações:

- Para as pressões de 176 a 300 mbar tem-se;

$$\Delta P = \left[ 0.4566 + \left( \frac{108.6}{Re_g} \right) \right] \left[ \frac{\rho_g U_{ge}^2}{d_{eq} g_c} \right] \left[ \frac{1}{1 - C_3 Fr^{0.5}} \right]^5 \quad (4.3)$$

onde o valor encontrado para  $C_3$  foi de 48,6.



- Para as pressões de 745 a 1008 mbar tem-se;

$$\Delta P = \left[ -0.04502 + \left( \frac{593}{Re_g} \right) \right] \left[ \frac{\rho_g U_{ge}^2}{d_{eq} g_c} \right] \left[ \frac{1}{1 - C_3 Fr^{0.5}} \right]^5 \quad (4.4)$$

onde o valor encontrado para  $C_3$  foi de 42,73.

Estas equações 4.2, 4.3 e 4.4 apresentaram resultados melhores do que os apresentados pela equação 2.2.

Para a equação de **Stichlmair et alii**, foi proposta a obtenção das constantes da equação 2.12, que são constantes características de cada recheio.

$$f_o = \frac{C_1}{Re_g} + \frac{C_2}{Re_g^{0.5}} + C_3 \quad (2.12)$$

Os valores de  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  obtidos pelo Programa de Ajuste são os seguintes:

$$C_1=25; C_2=2,15 \text{ e } C_3=1$$

Foi Proposto também, a obtenção das constantes características do recheio **KERAPACK** através do uso do **SIMPLEX**, obtendo os seguintes valores para as constantes:

- Para pressões de 176, 225 e 300 mbar obteve-se;

$$C_1=324,9; C_2=-54,69 \text{ e } C_3=3,138$$

Para pressões de 745, 850 e 1008 mbar obteve-se;

$$C_1=166,0, C_2=0,6642 \text{ e } C_3=0,6946$$

Os resultados apresentados pelo uso da equação 2.8 com as constantes obtidas pelo Programa de Ajuste das Constantes e as obtidas pelo **SIMPLEX** conduziram a resultados bem melhores que as constantes usadas no primeiro calculo, que são do recheio metálico

SULZER BX, que por ser do mesmo fabricante do recheio KERAPACK foi usado, tendo como consequência, altos desvios quando comparados com os resultados experimentais.

#### 5.4 EM RELAÇÃO AS EQUAÇÕES DESENVOLVIDAS A PARTIR DAS EQUAÇÕES EXISTENTES NA LITERATURA PARA A PREDIÇÃO DA EFICIÊNCIA.

Foi proposto a modificação das constantes da equação 2.16 através do uso do SIMPLEX tendo-se os seguintes resultados:

- Para pressões de 176 a 300 mbar a equação obtida foi a seguinte;

$$Sh_g = 0.1357 \times 10^{-2} (Re_g)^{1.052} (Sc_g)^{0.43789} \quad (4.5)$$

- Para pressões de 745 a 1008 mbar a equação obtida foi a seguinte;

$$Sh_g = 0.2370 \times 10^{-4} (Re_g)^{1.3832} (Sc_g)^{0.57576} \quad (4.6)$$

Estas equações levam a equação 2.27 a apresentar resultados bem melhores do que os resultados apresentados quando se usa a equação 2.16.

#### 5.5 RESUMO DOS RESULTADOS

A seguir, será mostrado um resumo dos resultados apresentados pelo trabalho quanto ao erro relativo médio de cada

modelo original e suas modificações bem como, esse resultados poderão ser visualizados graficamente, tomando como referência a pressão de 300 mbar. Como observação, deve ser colocado que todas as outras pressões utilizadas apresentam o comportamento similar.

- PERDA DE CARGA

\* MODELO DE BRAVO

	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
ORIGINAL	76,67
PROGRAMA DE AJUSTE	27,37
SIMPLEX	23,30

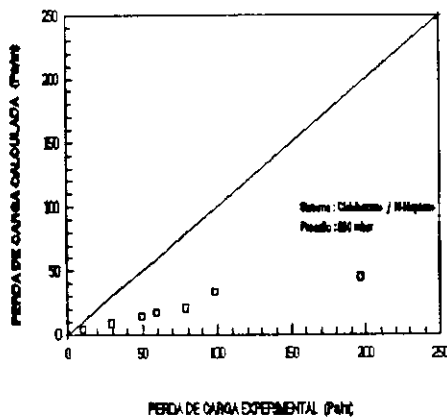


Figura 5.1 - Bravo original

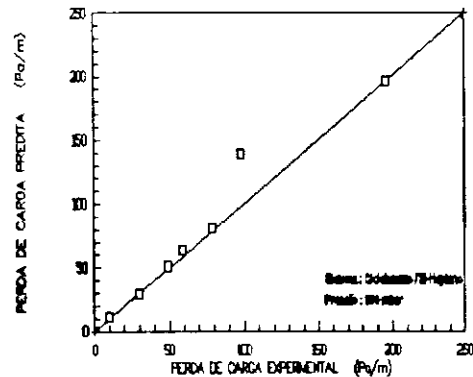


Figura 5.2 - Bravo com as constantes modificadas pelo Programa de Ajuste

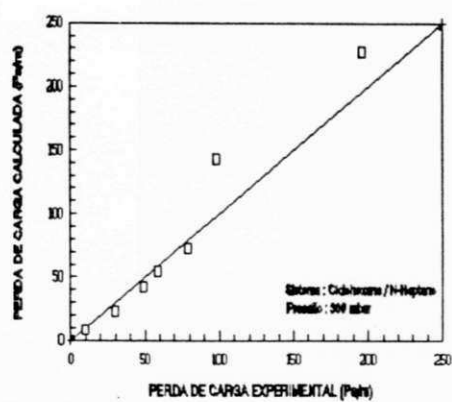


Figura 5.3 - Bravo com as constantes obtidas pelo SIMPLEX

\* MODELO DE STICHLMAIR

	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
ORIGINAL	54,16
PROGRAMA DE AJUSTE	32,44
SIMPLEX	23,64

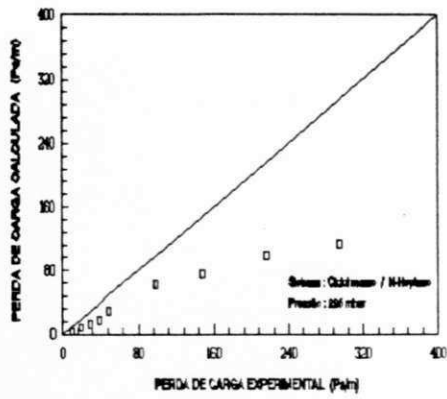


Figura 5.4 - Sticlmair com as constantes originais

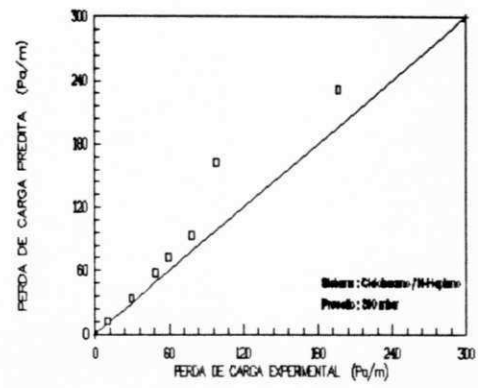


Figura 5.5 - Sticlmair com as constantes obtidas pelo Programa de Ajuste

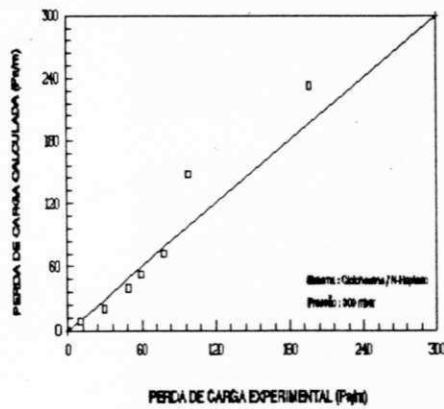


Figura 5.6 - Sticlmair com as constantes obtidas pelo SIMPLEX

- EFICIÊNCIA

\* MODELO DE BRAVO

	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
ORIGINAL	77,99
SIMPLEX	15,23

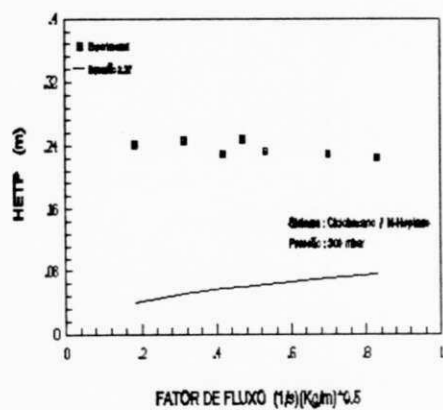


Figura 5.7 - Bravo com as constantes originais

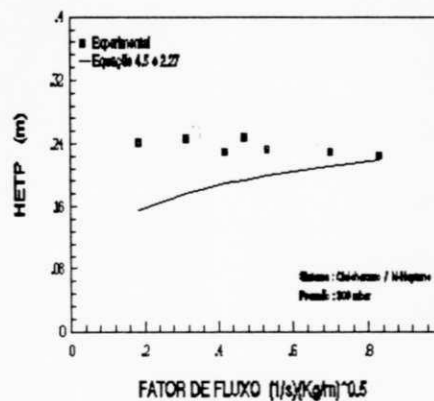


Figura 5.8 - Bravo com as constantes obtidas pelo SIMPLEX

## 5.6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- É de importância que se faça a determinação dos parâmetros desconhecidos do recheio KERAPACK, para que se possa utilizar as equações de Bravo et alii e a de Stichlmair et alii para o cálculo da perda de carga e a equação de Bravo et alii para a predição da eficiência. Para se determinar estes parâmetros será necessário dispor de uma amostra do recheio para que se possa medir estes parâmetros. Uma vez feita a determinação deve fazer a comparação dos resultados apresentados pelos modelos com estes parâmetros e compara-los com os resultados experimentais e se possível, confronta-los com os resultados apresentados por este trabalho.

- Estudo da influência da velocidade do gás sobre a retenção de líquido (Holdup) na coluna.

- Estudo do Ponto de Inundação e seus efeitos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACKER, T. C. et alii. The Course of Liquor Flow Packed Towers.  
Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 31, 296, 1935.
- BENNET, C. O. & MYERS, J. E. Momentum, Heat and Mass Transfer.  
New York, Mc Graw-Hill, Inc., 1ª ed., 1962.
- BILLET, R. I. Chem. E. Symposium Series, 32, 1969.
- BOLLES, W. L. & FAIR, J. R. Int. Chem. Eng. Symp. Ser. Nº 56,  
3.3/35, 1979.
- BOLLES, W. L. & FAIR, J. R. Chem. Eng., 89(14), 109, Jul.  
1982.
- BRAVO, J. L. & FAIR, J. R. Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.,  
21, 162, 1982.
- BRAVO, J. L. et alii. Mass Transfer in Gauze Packing.  
Hydrocarbon Processing, Vol. 64. Nº 1, p. 91, 1985.
- BRAVO, J. L. et alii. Pressure Drop in Structured Packing.  
Hydrocarbon Processing, 65, p. 45, Mar., 1986.
- BROWNELL, L. E. & KATZ, D. L. Flow of Fluids Through Porous  
Media-I Single Homogeneous Fluids. Chem. Eng. Prog., 43(10),  
537, 1947.
- BÜHLMANN, U. Performance of ROMBOPAK, Structured Column Packed,  
in Distillation. I. Chem. E. Symposium Series Nº 104, p. A115,  
1987.
- CALDAS, J. N. & LACERDA, A. I., Torres Recheadas. JR ED.,  
1988.
- COKER, A. K. Understand the Basics of Packed-Column Design.  
Chem. Eng. Prog., 93, 1991.



- ECKERT, J. S. Design Techniques for Sizing Packed Towers. Chem Eng. Prog., 57(9), 54, 1961.
- ECKERT, J. S. Tower Packing - Comparative Performance. Chem. Eng. Prog., 59(5), 76, 1963.
- ECKERT, J. S. Tray and Packing - Selecting the Proper Distillation Column Packing. Chem. Eng. Prog., 66(3), 39 1970.
- ECKERT, J. S. How Tower Packing Behave. Chem. Eng. (NY), 82(8), 70, 1975.
- ECKERT, J. S. Desing of Packed Columns. In: Handb. Sep. Tech. Chem. Eng., Secction 1.7, p. 221, Mc Graw-Hill.Co, 1979.
- ECKERT, J. S. et alii. What Affects Packing Performance. Chem. Eng. Prog. 62(1), 59, 1966.
- FAIR, R. J. Chem. Eng. Progr. 66(3), 45, 1970.
- FAIR, R. J., Historical Development of Distillation Equipment. AIChE Symposium Series, Nº 235, Vol 79., 1983.
- FAIR, J. R., Packed Column Technology, Curso especial na Petrobras, 1985.
- FAIR, J. R. & BRAVO, J. L. Prediction of Mass Transfer Efficiencies and Pressure Drop for Structured Tower Packing in Vapour Liquid/Service. I. Chem. E. Symposium Series Nº 104, p. A183, 1987.
- FAIR, J. R. et alii Design of Distillation Columns Containing Structured Packing. Presented at Spring National Meeting, American Institute of Chemical Eng, Houston, Texas, April, 1989.
- FAIR, J. R. et alii Distilation Columns Containing Structured Packing. Chem. Eng. Prog., p. 19, Jan., 1990.
- FORBES, R. J., Short History of the Art of Distillation, E. J.

- Brill, Leiden (1948).
- GILLILAND, E. R. & SHERWOOD, T. K., Ind. Eng. Chem., 26, p. 516, 1934.
- HUBER, M. & MEIER, W. Sulzer Columns For Vacuum Rectification and Mass Transfer. Sulzer Technical Review, 1, 1975.
- HUFTON, J. R. et alii. Scale-Up of Laboratory Data for Distillation Columns Containing Corrugated Metal-Type Structured Packing. Ind. Eng. Chem. Res., vol 27, N° 11, 1988.
- JURS, Peter C. Computer Software Applications in Chemistry, pag. 125 - 140, 1987.
- KOLLAR, V. & BRÖZ, Z. Two-phase Countercurrent Flow Through a Bed of Packing. Collect. Czech. Chem. Commun, 30, 2527, 1965.
- LEVA, M., Tower Packing and Packed Tower Design, U. S. Stoneware Co., Akron, 1953.
- LEVA, M., Chem. Eng. Prog. Symposium Series, 50(10): 51, 1954.
- LEVA, M., Reconsider Packed-Tower Pressure-Drop Correlations. Chem. Eng. Prog., p.65, Jan, 1992.
- LEWIS, W. K., Ind. Eng. Chem. 14, 492, 1922.
- LOBO, W. E. et alii., Limiting Capacity of Dumped Tower Packing. Trans. AIChE, 41, 693, 1945.
- MEIER, W. et alii. Performance of a New, High Efficiency Packing. Chem. Eng. Prog., 73(11), 71, 1977.
- MEIER, W. et alii. Chem. Eng. Symposium Series, 56, 3, 1979.
- MCCABE, W. L. & THIELE, E. W., Ind. Eng. Chem. 17, 605, 1925.
- NORTON COMPANY, Design Information for Packed Towers, Bolletín DC-11, 1977.
- NYGREN, P. G. - High-Efficiency Low Pressure Drop Packing. in: Handb. Sep. Tech. Chem. Eng., Section 1.8, p.241, Mc Graw-

Hill. Co., 1979.

PERRY, R. H. & GREEN, D. W. - (Editores). Perry's Chemical Engineers Handbook. Mc Graw-Hill, N. York, 6<sup>o</sup> ed., 1984.

PETERS, W. A., Ind. Eng. Chem. 14, 476, 1922.

PIGFORD, R. L. & JOHNSTONE, H. F., Trans. AIChE, 38, 25, 1942.

RUKOVENA, F. & STRIGLE, R. F. Effect of Pressure on Structured Packing Performance. Presented at AIChE Spring National Meeting, Houston, Texas, April, 1989.

SAKATA, M., "Tests of 1000, 250 and 70 mm Diameter Columns With Koch Sulzer Packing, " Plant Test Report N<sup>o</sup> 22, Fractionation Research, Inc., S. Pasadena, Calif., Feb. 15, 1972.

SHERWOOD, T. K et alii. Flooding Velocities in Packed Columns. Ind. Eng. Chem., 30(7), 765, 1938.

SILVEY, F. C. & KELLER, G. J. Packed Tower-Testing on a Comercial Scale. Chem. Eng. Prog., 62(1), 68, 1966.

STICHLMAIR, J. et alii., General Model for Prediction of Pressure Drop and Capacity of Countercurrent Gas/Liquid Packed columns. Gas Sep. Purif., 3. p. 19, 1989.

TREYBAL, R. C. Mass Transfer Operations. Interscience, 3<sup>a</sup> ed., 1980.

UCHIDA, S. & FUJITA, S. J. Soc. Chem. Ind., 39, 886, 1936.

UNDERWOOD, A. J. V., Trans. Inst. Chem. Engrs. 13, 34(1935).

ZENZ, F. A. Mechanism of Countercurrent Gas-Liquid Flow Through Packed Towers. Chem. Eng. Prog., 43(8), 415, 1947.

ZENZ, F. A. What Every Engineer Should Know About Packed Tower Operations. Chem. Eng., 60(8), 176, 1953.

WHITE, A. M. Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 31, 390, 1935.

WHITMAN, W. G., Chem. Met. Eng. 29, 146, 1923.

WINKLE, M. V., Distillation. Mc Graw-Hill Book Co., N.York, 1<sup>st</sup>  
ed. 1967.

WU, K. Y. & CHEN, G. K. Large-Scale Pilot Columns and Packed  
Column Scale-Up. I. Chem. E. Symposium Series N<sup>o</sup> 104, 1987.

## APÊNDICE

### USANDO O SIMPLEX

O **SIMPLEX** é um método de otimização seqüencial que envolve repetidas observações para a resposta do sistema. Para um maior detalhamento a respeito do método devem ser consultadas as bibliografias pertinentes que encontram-se nas referências bibliograficas deste trabalho.

Para a obtenção das constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , específicas do recheio **KERAPACK**, para ser utilizada na equação de **Bravo**, utilizou-se a seguinte metodologia:

Como já era disponível os dados experimentais para a perda de carga e todas as propriedades físicas, utilizou-se a seguinte equação diretamente no programa **SIMPLEX** e obteve-se os parâmetros que faltavam.

$$\Delta P = \left[ C_1 + \left( \frac{C_2}{Re_g} \right) \right] \left[ \frac{\rho_g U_{ge}^2}{d_{eq} g_c} \right] \left[ \frac{1}{1 - C_3 F_I^{0.5}} \right]^5$$

Para a obtenção das constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , características do **KERAPACK** para a utilização da equação de **Stichlmair** utilizou-se a seguinte metodologia:

O Fator de fricção  $f_o$  da partícula foi obtida através da fórmula;

$$f_o = \frac{\Delta p d_p}{\rho_g U_{ge}^2} \quad *$$

\* veja Fair, 1985.

Uma vez obtido o valor de  $f_o$ , utilizava-se a seguinte equação diretamente no programa **SIMPLEX** obtendo-se os parâmetros procurados.

$$f_o = \frac{C_1}{Re_g} + \frac{C_2}{Re_g^{0.5}} + C_3$$

Para o modelo de **Bravo** para a predição da eficiência foi proposta uma modificação das constantes da equação 2.16,

$$Sh_g = 0.0338 (Re_g)^{0.8} (Sc_g)^{0.333}$$

Com um processo inverso obteve-se o valor do  $Sh_g$ , utilizando a equação abaixo no programa **SIMPLEX** e obtendo-se as novas constantes.

$$Sh_g = X(1) (Re_g)^{X(2)} (Sc_g)^{X(3)}$$