

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

HIDRODINÂMICA DE DIVERSOS TIPOS DE PRATOS: UM ESTUDO COMPARA
TIVO

SANDRA MARIA SARMENTO

Campina Grande - Paraíba

Outubro de 1988

D/S
582.03 (043)
S. 216 h

SANDRA MARIA SARMENTO

HIDRODINÂMICA DE DIVERSOS TIPOS DE PRATOS: UM ESTUDO COMPARATIVO

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Operações e Processos

PROFESSOR ORIENTADOR: Michel François Fossy

CAMPINA GRANDE, PB.

1988



S246n

Sarmiento, Sandra Maria

Hidrodinamica de diversos tipos de pratos : um estudo comparativo / Sandra Maria Sarmiento. - Campina Grande, 1988.

93 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Quimica) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Engenharia Quimica - 2. Hidrodinamica - 3. Pratos de Borbulhamento 4. Bandejas de Borbulhamento 5. Dissertacao I. Fossy, Michel Francois II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 66.01(043)

HIDRODINÂMICA DE DIVERSOS TIPOS DE PRATOS: UM ESTUDO COMPA
RATIVO

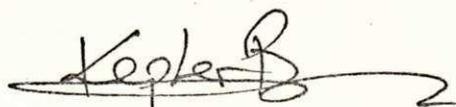
SANDRA MARIA SARMENTO

Dissertação Aprovada em 26.10.88



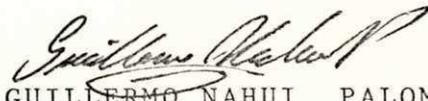
MICHEL FRANÇOIS FOSSY

Orientador



KEPLER BORGES FRANÇA

Componente da Banca



GUILLERMO NAHUI PALOMINO

Componente da Banca

CAMPINA GRANDE

OUTUBRO/1988

DEDICATÓRIA

Aos homens, que apesar de terem fe
ridos a alma e o corpo, sobrevivem
tornando-se agentes de uma sociedade
futura; quiçã mais bonita e humana.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Michel F. Fossy, pela orientação deste trabalho, pela dedicação e contribuição prestada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFPB, finalmente pela sua amizade.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química, na pessoa do Professor Kepler Borges França, pelo apoio e auxílio para a realização desta dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Química da UFPB por ter cedido suas instalações possibilitando a realização desta pesquisa.

Ao Departamento de Engenharia Química e Química Industrial da UFPE, por haver me liberado durante o período destinado à elaboração desta dissertação.

Aos professores, que contribuíram, de uma forma ou de outra para minha formação.

Ao Professor Carlos Edison Lopes, pela figura amiga e incentivadora durante minha vida acadêmica e profissional.

A Sr^a Maria José Bezerra Cavalcanti, pela atenção, dedicação e amizade, dispensadas a minha pessoa e aos alunos do pós-graduação em Engenharia Química, pela datilografia do original deste trabalho.

Ao Sr. José Marques da Cunha, pela ajuda prestada durante o trabalho de Laboratório.

RESUMO

Com o objetivo de otimizar, em termos econômicos e funcionais o contato entre fases nas torres de separação, foram sendo propostos ao longo dos anos diversos tipos de pratos ou bandejas de borbulhamento.

O primeiro e mais dispendioso dos pratos propostos é o de campânula (BUBBLE - cap Tray), que apresenta a maior eficiência entre os demais. Em seguida, apareceu o prato perfurado (Sieve-Tray), que apesar de ser o mais viável em termos de economia e design, apresenta sérias desvantagens em seu uso, como por exemplo o fenômeno de gotejamento para o prato anterior e aumento de suas perfurações mediante a corrosão. Esses fenômenos contribuem, além de outros, a uma queda na eficiência do processo.

Para suprir as desvantagens funcionais dos pratos perfurados e reduzir os gastos em termos de design apresentado pelos pratos de campânulas, foram lançados os pratos valvulados (Valve Tray). É uma versão moderna dos pratos perfurados, onde os orifícios são cobertos por campânulas de design simplificados (válvulas) que apresentam uma passagem variável para a fase gasosa.

Recentemente, vem sendo utilizado pelas indústrias alemãs e Japonesas, pratos híbridos dos pratos perfurados e valvulados, ou seja os pratos misto (Sieve-Valve Tray) e apresentam uma eficiência menor do que os perfurados porém per

podem trabalhar numa faixa de operabilidade de bem mais ampla e estável.

O objetivo desta pesquisa é estudar e fazer um paralelo entre a hidrodinâmica dos três últimos pratos citados, dando-se ênfase a influência da camada líquida das vazões do líquido, do gás e do peso das válvulas e nº de orifícios sobre o prato, os gradientes de pressão através dos pratos seco e irrigado.

Dentre as numerosas configurações estudadas para os pratos Mistos, concluiu-se que os modelos mistos com três furos e com cinco furos apresentam um melhor desempenho em termos de comportamento hidrodinâmico.

ABSTRACT

With the objective to optimize, in functional and economic terms, the contact between phases in the separation towers, several types of plates or trays of bubbling were proposed during the years.

The first one, proposed was of the bubble cap tray type, which has better efficiency among the others, but is more expensive. Then appeared the perforated plate type (Seive-Tray), in spite of being more viable in term of economics design, gives serious disadvantages in its use, as for example, the weeping phenomenon occurs on the back plate and increases its perforation by corrosion. These phenomena contribute, among the others, a fall in efficiency of the process.

To make up for these functional disadvantages of perforated plates and reduce the expenditure in terms of design given by the Bubble Cap-Tray, the Valve-Tray plates were started. It is a modern version of the perforated plate, where the holes are covered by simplified design of caps (valves) that has a variable passage for gaseous phase.

Japanese and German industries are recently using hybrid plates of the perforate plate and valves, (mixer plates -seive-valve Tray) which show lesser efficiency than the perforates ones yet allowing to work in larger range of operation and are more stable.

The objective of this research is to study and compare hydrodynamics of the last three plates mentioned above, given emphases on the influence of liquid layer of the liquid flow, of the gas and of the weight of the valves and number of the holes on the plates, the pressure gradients through the dry and irrigated plates.

Among the various configurations studied for mixed plates, it was concluded that mixed models with three holes and with five holes show better performance in term of hydrodynamic behaviour.

SIMBOLOGIA

A	área do prato compreendida entre e as bordas do prato
A _o	
A _v	área total aberta para todas as válvulas (m ²) máxima
A _{vMAX} , A _{vmin}	Velocidade do orifício do gás mínima e m/s)
A _{vo}	área total inicialmente aberta para todas as válvulas (m ²)
c	altura da abertura das válvulas (pol) 2q
c _o	fator de atrito
c _l	fator adimensional
c _{up}	Coefficiente de arraste relacionado com o efeito de borde
d _o	diâmetro dos orifícios (m)
d _v	diâmetro das válvulas
f _c	área da secção transversal da coluna (m ²)
f _o	área das perfurações (m ²)
F _o	área aberta desta fase gasosa (m ²)
F _{va}	fator de energia V _o √ρg
g	acumulação da gravidade m/s ²
G _v	peso das válvulas (Kg/m ²)
H	Queda de Pressão do prato seco (pē H ₂ O
h _f	altura da espuma (Pol)
h _h , h _s	queda de Pressão através do Prato seco (pol de liq)
H _L	altura do líquido não aerado no prato (pol.liq)
h _{ow}	altura da crista sobre o vertedor, pol liq.

h_w	altura do vertedoro (m) pol liq
H_v	espessura da válvula (Pol)
h_T	queda de pressão total no prato (pol liq.
k	razão entre o peso específico da espuma e do líquido
k_{va}	coeficiente de balanço aberto
k_{uf}	coeficiente de balanço fechado
l	comprimento do vertedor (m)
L	vazão líquido (m^3/h)
La, c	velocidade do líquido básica na área ativa do (m/h)
n, n_2	expoentes
M_v	massa da válvula (Kg)
Q	vazão volumétrica do gás (m^3/h)
Re	número de Reynold
R_{vp}	razão entre pesos da válvula com pernas e sem pernas
t	distância entre os centros das válvulas (m)
V_o	velocidade de orifício (m/s)
V_{vbf}	velocidade de orifício no prato de balanço fechado ($P\bar{e}/s$)
V_{vba}	velocidade de orifício no ponto de balanço aberto
σ	coeficiente de fluxo acima de vertedoro
β	fator de aeração
γ_g	peso específico do gás kgf/m^3
γ_l	peso específico do líquido kgf/m^3
ΔH	altura de líquido constituída pela diferença pela camada de líquido não disperso e a altura do vertedoro (m)
ΔP_L	gradiente de pressão através da camada líquida cm H_2O

- ΔP_{g-1} gradiente de pressão através do prato irrigado
(cmH₂O)
- ΔP_s gradiente de pressão através do prato seco (cmH₂O)
- ΔP_o gradiente de pressão necessário para superar a ten
são superficial do líquido (cmH₂O)
- ΔP_{sa} gradiente de pressão através do prato seco no ponto
de balanço aberto (Pol H₂O)
- ΔP_{sf} gradiente de pressão através do prato seco no ponto
de balanço fechado (Pol H₂O)
- δ_p espessura do prato (m)
- $\xi, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ - coeficiente de atrito
- λ coeficiente de atrito para tubos
- $\rho_v, \rho_L, \rho_{vm}$ - densidade específica do gás, do líquido e do
material de que a válvula é feita kg/m³
- σ tensão superficial do líquido kg/m²
- ϕ densidade da espessura

INDICE

CAPÍTULO I	- Introdução.....	01
CAPÍTULO II	- Revisão Bibliográfica.....	04
2.1.	- Hidrodinâmica de Pratos Perfurados....	04
2.1.1.	Performance de Prato Perfurado Seco.....	04
2.1.2.	Performance de Prato Perfurado Irrigado.....	06
2.2.	- Hidrodinâmica de Pratos Valvulados....	09
2.2.1.	Considerações gerais.....	09
2.2.2.	Comparação entre Pratos Valvulados e Perfurados.....	10
2.2.3.	Performance de Prato Valvulado Seco.....	12
2.2.4.	Performance de Prato Valvulado Irrigado.....	15
2.3.	- Hidrodinâmica de Pratos Mistos.....	18
2.3.1.	Performance de Pratos Mistos Secos.....	18
2.3.2.	Performance de Pratos Mistos Irrigados.....	19
CAPÍTULO III	- Materiais e Métodos.....	20
3.1.	- Equipamentos de Apoio.....	22
3.2.	- Metodologia Experimental.....	22

CAPÍTULO IV - Resultado e Discussões.....	25
4.1. - Pratos Perfurados.....	26
4.1.1. Pratos Perfurados Secos.....	26
4.1.2. Pratos Perfurados Irrigados.....	26
4.2. - Pratos Valvulados.....	29
4.2.1. Pratos Valvulados Secos.....	30
4.2.2. Pratos Valvulados Irrigados.....	31
4.3. - Pratos Mistos.....	34
4.3.1. Pratos Mistos Secos.....	35
4.3.2. Pratos Mistos Irrigados.....	39
4.4. - Comparação entre os Pratos.....	43
CAPÍTULO V - Conclusão.....	46
CAPÍTULO VI - Sugestões para Pesquisas Vindoras.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
APÊNDICE A - Tabelas.....	52
APÊNDICE B - Figuras	67

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As torres de separação são construídas visando-se obter uma área de contato máxima entre as fases em um determinado prato, uma vez que a taxa de transferência de massa é função direta desse parâmetro.

Com o objetivo de obter-se máxima eficiência e economia em termos de operabilidade e design das torres de separação, vários tipos de pratos de borbulhamento têm sido propostos e utilizados ao longo do desenvolvimento dos conhecimentos das operações unitárias. A principal diferença, em termos de design, entre os pratos propostos, está nos dispositivos utilizados para promoverem o contato entre as fases líquida e gasosa.

O mais antigo dos pratos utilizados é o de campânula (Bubble-cap Tray). A favor de sua utilização existe o fato de apresentar, a maior eficiência entre os demais propostos até então (1). A desvantagem em seu uso, reside no alto custo em sua construção, mas apesar disto, tem sido largamente empregado nas indústrias químicas e petroquímica.

Em seguida aos pratos de campânula, surgiram os pratos perfurados (Sieve Tray). Foram concebidos com o objetivo de contornar-se a desvantagem econômica oferecida por aqueles.

Este novo tipo de prato não foi muito difundido na

indústria, devido a algumas propriedades inerentes a sua concepção. Comercialmente, sua principal aplicação é encontrada nas indústrias de cerveja.

Segundo Carrey (2), as principais desvantagens apresentadas pelos pratos perfurados são o fenômeno de gotejamento para o prato anterior (weeping) quando se opera a baixas vazões de gás, e o aumento do diâmetro das perfurações, devido a corrosão. Ambos os fenômenos apresentados acima como desvantagens ao uso dos pratos perfurados, levam a redução da eficiência do processo de separação.

Devido a limitação, na operabilidade, encontrada ao usar-se os pratos perfurados a baixa vazão de gás, foram propostos os pratos valvulados (Valve Tray). Tais pratos foram idealizados para suprir a deficiência dos pratos perfurados, uma vez que este último prato oferece uma faixa de eficiência próxima a daquele porém com uma estabilidade bem maior quando se trabalha a baixas vazões da fase gasosa, ou seja eliminando-se a possibilidade de ocorrer gotejamento para o prato anterior.

Os pratos valvulados utilizam válvulas para distribuir a fase gasosa na fase líquida. Essas não passam de campânulas de design simplificado e que apresentam porém, uma passagem variável da fase gasosa. São adaptadas ao prato, cobrindo-lhe as perfurações e permitindo um deslocamento ascendente próprio variável com a vazão do vapor. Geralmente, filas de válvulas de pesos diferentes, são alternadas, favorecendo desta forma a uma melhor distribuição do gás no líquido.

Recentemente, um novo tipo de prato tem sido utiliza

do nas indústrias Japonesas e Alemão (3), ou seja o Prato Misto (Sieve-Valve Tray). Consiste de uma combinação de válvulas e perfurações, distribuídas sobre a bandeja dentro de um determinado arranjo.

Estão apresentando uma eficiência um pouco inferior, em comparação com a oferecida pelos pratos perfurados, porém estão bem a frente destes em termos de operabilidade uma vez que podem ser utilizados estavelmente numa faixa de vazão de gás bem mais ampla. (4).

Esta pesquisa visa adicionar à área de processos de separação, dados sobre o comportamento hidráulico dos pratos mistos, uma vez que pouca coisa sobre este novo tipo de prato tem sido encontrada na literatura existente.

Diante da vasta gama de parâmetros existentes na hidráulica de pratos, este trabalho procurou apenas investigar como as vazões dos fluxos de líquido e de gás, o peso das válvulas, influenciaram a queda de pressão sobre o prato e bem como aos coeficientes de arrastes. A partir da versatilidade do prato construído, houve também a oportunidade de se colher dados sobre os pratos perfurados e valvulados, favorecendo a realização de um estudo comparativo entre os mesmos e o misto.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os pratos perfurados e os valvulados, têm sido empregados vastamente. Entretanto, um prato híbrido destes dois vem sendo testado por algumas indústrias na Alemanha e no Japão.

Um levantamento de dados sobre a hidrodinâmica dos pratos mistos, como são chamados, e seus precursores contribuirá na obtenção de informações sobre o desempenho desse novo prato em relação aos outros tipos mencionados.

2. 1 - Hidrodinâmica de Pratos Perfurados

O contato entre as fases líquida e gasosa num prato perfurado, dá-se através da passagem do gás pelas perfurações existentes no prato, para a camada de líquido que escoou sobre as mesmas. Esse contato é realizado com perda de energia para o sistema.

2.1.1 - Performance de Prato Perfurado Seco

A queda de Pressão em um prato perfurado seco (ΔP_s) é devida a:

- Contração do jato de gás na entrada das perfurações;

- Atrito nas perfurações;
- Expansão do jato de gás na saída das perfurações.

ΔP_s é função da velocidade do gás, porém muitos pesquisadores desenvolveram expressões que também evidenciam a sua dependência com outros parâmetros, tais como a espessura do prato e o diâmetro das perfurações.

Segundo Arnold et alii (4), pode-se dizer que:

$$\Delta P_s = f(V_o, d_o)$$

Foi observado que, a queda de pressão em um prato seco aumenta diretamente com o diâmetro das perfurações.

Os dados obtidos para o gradiente de Pressão foram correlacionados para se obter o coeficiente de orifício, ou seja:

$$V_o = C_o (2gH)^{0,5} \quad (1)$$

O coeficiente de orifício variou na faixa de 0,55-0,85.

Mcalister et alii (5), levando em conta a espessura do prato, formularam a seguinte expressão para ΔP_s :

$$\Delta P_s = K \left[0,4 \left(0,125 - \frac{f_o}{f_c} \right) + \lambda \left(\frac{\delta p}{d_o} \right) + \left(1 + \frac{f_o}{f_c} \right)^2 \right] \frac{V_o^2}{2g} \quad (2)$$

onde o coeficiente K, pode ser obtido através de um normograma, que evidencia a dependência deste coeficiente com $\frac{\delta p}{d_o}$.

Sugerem também, que para uma primeira aproximação ΔP_s pode ser calculado, sem levar em conta a espessura do prato, através da expressão:

$$\Delta P_s = \xi \frac{V_o^2}{2g} \gamma_g \quad (3)$$

Para pratos industriais, tem-se os seguintes limites:

$$3 < \frac{f_o}{f_c} < 5 \rightarrow 1,95 < \xi < 2,0.$$

De acordo com Smith-Van-Winkle (6) e Van Winkle-Kolodzee

(7), ΔP_s é dado por:

$$\Delta P_s = 0,186 \left(\frac{V_o}{C_o} \right)^2 \frac{\rho V}{\rho L} \left[1 - \left(\frac{A_b}{A_a} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Onde: $C_o = f$ (Re, Espessura do prato, diâmetro e arranjo dos furos)

Eduljee (8), expressou ΔP_s para prato perfurado como:

$$\Delta P_s = 0,186 \left(\frac{V_o}{C_o} \right)^2 \frac{\rho V}{\rho L} \quad (5)$$

sendo $C_o = 0,83$ para perfurações de 1/4 pol de diâmetro in terno.

Pinczewski et alii (9), demonstraram experimental mente que os dados obtidos para cálculo de ΔP_s , variam sig nificante com a superfície total livre das perfurações.

Recentemente Fasesan (10), coletou dados de um prato perfurado com uma superfície total livre das perfurações, de 14,2%, cujo diâmetro era de 6,35mm. Comparou os resultados obtidos com valores preditos obtidos a partir da equação(5), obtendo um desvio da ordem de 3%.

2.1.2 - Performance de Prato Perfurado Irrigado

A hidrodinâmica de um prato perfurado irrigado, não é determinada apenas pela sua geometria, mas também pelas va zões de líquido e gás envolvidas no processo.

As condições típicas de operação para esse tipo de pra to estão representadas na figura (5) :

Curva 1: Representa a queda de pressão para o sistema seco evidenciando a aproximação entre a queda de pressão

e o quadrado da velocidade do gás ($\Delta P_g \approx V_o^2$):

Curva 3: É tipicamente encontrada para os pratos perfurados irrigados. Os pontos nela assinalados representam condições de operação, ou seja:

- Abaixo do ponto A as bolhas passam individualmente por alguns buracos, caracterizando um regime não estacionário onde ocorre a drenagem do líquido para o prato anterior;
- A partir do ponto B, as bolhas passam por todos os buracos, restabelecendo uma condição de operação normal e estável;
- Na região B-C, inicia-se um movimento ondulatório no prato, que faz o líquido e a espuma moverem-se também para trás, em direção contrária ao escoamento, ou seja o fenômeno de Back-Mixing está presente no prato.

Curva 2: Característica nos pratos onde a vazão do líquido é baixa.

É conveniente considerar que a queda de pressão em um prato irrigado, consiste da soma de três resistências em série:

- Queda de pressão devido ao fluxo de gás através da perfuração (ΔP_g);
- Queda de pressão necessária para superar a tensão superficial (ΔP_σ);
- Queda de pressão requerida para superar o peso da coluna de líquido no prato ΔP_L .

Em termos matemáticos, pode-se representar esse somatório como:

$$\Delta P_{g-1} = \Delta P_s + \Delta P_\sigma + \Delta P_L \quad (5)$$

$$\text{onde } \Delta P_\sigma = \frac{4\sigma}{d_o} \rightarrow d_o < 1\text{mm} \quad (6)$$

$$\Delta P_\sigma = \frac{4\sigma}{1,3 d_o + 0,08 d_o^2} \rightarrow d_o > 1\text{mm} \quad (7)$$

$$\Delta P_L = 1,3 (k h_w + \sqrt[3]{k \Delta h}) \gamma l \quad \Delta h = \sqrt{\left(\frac{L}{\alpha I}\right)^2} \quad (8)$$

Segundo Smith (1), as perdas de energia em um prato irrigado podem ser correlacionadas através do fator de aeração β :

$$H_c = \beta (h_w + h_{ow}) \quad (9)$$

$$\beta = \frac{h_T + h_h}{h_w + h_{ow}} \quad (10)$$

As expressões acima não levam a bons resultados, uma vez que dependem de correlações para avaliação da queda de pressão para um prato seco.

Uma aproximação melhor, para avaliação de β , é feita através de uma expressão resultante da observação direta da variação da altura da espuma no prato combinada com medidas manométricas ou seja $\phi = \frac{h_l}{h_f}$

Hutchinson et alii (11), desenvolveram a seguinte relação teórica para correlacionar ϕ e β :

$$\beta = \frac{\phi + 1}{2} \quad (11)$$

Foss e Gerster (12), realizaram um estudo cuidadoso sobre a obtenção da densidade da espuma, em sistema ar-água. Seus dados foram plotados em gráfico, em função do parâmetro de energia cinética (Fva).

2.2 - Hidrodinâmica dos Pratos Valvulados

A passagem do gás para a camada de líquido que escoo sobre um prato valvulado, é regulada pela abertura variável oferecida pela válvula. A área disponível à passagem do gás (Slot area) varia diretamente com a vazão da fase gasosa.

As perdas de energias nos pratos valvulados assim como em qualquer outro, são representadas pelos gradientes de pressão em Prato seco (ΔP_s) e em Prato Irrigado (ΔP_{g-1}).

2.2.1 - Considerações Gerais

Segundo Norman e Grocott (13), as válvulas em um prato seco, oscilam entre uma posição média, quando o sistema opera com baixas vazões da fase gasosa. A altura da posição que as válvulas alcançaram acima do prato seco e a amplitude das oscilações crescem com a vazão do gás, até que se estabeleça um sistema estável.

Esses pesquisadores, também desenvolveram duas expressões que relacionam as forças que atuam sobre uma válvula.

Observaram que para uma determinada abertura da válvula, o gradiente de pressão em um prato seco é proporcional ao parâmetro $\rho V_0^2/2g$. Representaram esta proporcionalidade através das seguintes expressões:

$$\frac{C}{d_o} < 0,23 \rightarrow \frac{\Delta P_s}{(\rho V_0^2 / 2g)} = 0,541 \left(\frac{C}{d_o} \right)^{-1,75} \quad (12)$$

$$\frac{C}{d_o} > 0,23 \rightarrow \frac{\Delta P_s}{(\rho V^2 / 2g)} = 3,12 \quad (13)$$

Também tentaram explicar a instabilidade no comportamento das válvulas, quando a vazão do gás é baixa, figura (6): A válvula está em equilíbrio quando as forças que agem sobre ela são iguais ao seu peso. Nessa figura, podem ser vistas duas posições de equilíbrio, e uma oscilação da válvula entre estes dois pontos é observada (Efeito de Benoulli).

Bolles (14), formulou um método que permite se obter os principais parâmetros inerentes a hidráulica dos pratos valvulados. Assume que este tipo de prato comporta-se como um prato perfurado, com algumas exceções que são evidenciadas quando realizada comparação entre os dois tipos de pratos mencionados.

2.2.2- Comparação entre Pratos Valvulados (PV) e Perfurados (PF)

1. Um prato valvulado é similar a um perfurado, uma vez que possui vertedouro e orifícios;
2. Os orifícios encontrados nos PV são maiores;
3. Cada orifício, nos PV, é coberto por uma válvula que pode se mover livremente, para cima ou para baixo, motivada apenas por forças mecânicas que atuam sobre a válvula;
4. Billet et alli (15) realizaram estudo comparativo entre esses pratos usando o sistema Estireno-Etilbenzeno e concluíram que:
 - . A capacidade máxima dos dois pratos é essencialmente a mesma;

- . A capacidade mínima é maior para os pratos valvulados;
 - . A eficiência dos PV não cai quando a vazão do gás é baixa.
5. Os modelos físicos utilizados para predizer o gradiente de pressão, a eficiência, os pontos onde ocorrem os fenômenos de gotejamento e inundação no prato, são os mesmos que existem na literatura para os pratos perfurados, com exceção de:
- . Coeficiente de arraste para os pratos valvulados são maiores;
 - . Área de abertura (slot area) é variável.
6. Para altas vazões da fase gasosa, todas as válvulas estão completamente abertas. Nesta condição, a área de abertura é constante, comportando-se o prato valvulado, como um perfurado com orifícios grandes;
7. Para baixas vazões da fase gasosa, todas as válvulas estão fechadas, caracterizando um comportamento de prato perfurado com orifícios pequenos;
8. Para vazões intermediárias da fase gasosa, as válulas oscilam, apresentando um comportamento instável com algumas válvulas abertas e outras fechadas.

2.2.3-Performance de Prato Valvulado Seco

Segundo Kafarov (16), o gradiente de pressão através de um prato seco (ΔP_s), não varia uniformemente com a vazão do gás. Devido esse fato, torna-se difícil expressar a dependência de ΔP_s com a velocidade do gás.

Dados experimentais para pratos com válvulas tipo Glitsch, são traduzidos graficamente pela figura (7). Neste gráfico, são apontados três regiões de operações que são representadas por correlações, isto é: Para o gradiente de Pressão a velocidade do gás.

. Região I: Baixas vazões da fase gasosa (válvulas fechadas).

$$V_{I-II} = \sqrt{\frac{\xi_2}{\xi_1}} \frac{M_v g}{\gamma_g f_o} \quad (14)$$

$$\text{onde: } \xi_1 = 3500 (A_{V_o}/A_o)^{-1/2} \quad (15)$$

$$\xi_2 = 6,71 (A_o/A_v)^{-2,49} e 5,91 (A_o/A_v) \quad (16)$$

$$\Delta P_{sI} = \frac{\xi_1}{g} \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_l} \right) \left(\frac{V_o}{3600 A_o} \right)^2 \quad (\text{mmHg}) \quad (17)$$

. Região II : Do ponto A ao ponto B: válvulas parcialmente abertas.

$$V_{II-III} = 0,9 \sqrt{\frac{\xi_2}{\xi_4 - \xi_3}} \frac{M_v g}{\gamma_g f_o} \quad (\text{m/s}) \quad (18)$$

A_{VMAX}

$$\text{onde } \xi_3 = 920 (A_{VMAX}/A_o)^{-2,95} \quad (19)$$

$$\xi_4 = 2160 (A_{VMAX}/A_o)^{-0,8} \quad (20)$$

$$\Delta P = \xi_2 \left(\frac{M_v}{f_{0Y} L} \right) + \frac{\xi_2}{g} \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_L} \right) \frac{V_0 g}{3600 A_0} \quad (21)$$

. Região III: Válvulas totalmente abertas.

$$\Delta P_{sIII} = \frac{\xi_4}{g} \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_L} \right) \left(\frac{V_0 g}{3600 A_0} \right) \quad (22)$$

Bolles (14) sugeriu um modelo para descrever o comportamento dos pratos valvulados, como é mostrado na figura

8. Antes de apresentar a correlação para ΔP_s , é conveniente uma descrição do comportamento de uma bandeja ou prato valvulado.

A baixa velocidade da fase gasosa, todas as válvulas estão fechadas porém o gradiente de pressão (ΔP_s) cresce com este parâmetro até o ponto A (Ponto de Balanço Aberto). Neste ponto todas as válvulas permanecem fechadas porém na iminência de abrirem.

Após o ponto A ΔP_s , mantém-se constante, exibindo um platô até o ponto B (ponto de Balanço Aberto). Neste ponto, todas as válvulas estão abertas porém na iminência de fecharem.

Esse modelo, mostra que as válvulas fechadas ou abertas podem ser tratadas como um tubo, portanto o gradiente de pressão no prato seco pode ser dado pelas seguintes expressões:

$$\Delta P_{sf} = K_v f (\rho_v / \rho_L) \frac{V_0^2}{2g} \quad (23)$$

$$\Delta P_{sa} = K_v a (\rho_v / \rho_L) V_0^2 / 2g \quad (24)$$

onde:

$K_v f$ = e $K_v a$ = coef. de arraste dos pontos de Balanços fe

chado e aberto respectivamente.

Quando as válvulas estão parcialmente abertas, a principal fonte de queda de pressão é o seu próprio peso, ou seja:

$$\Delta P_s = C_{vp} H_v R_{vp} (\rho_v / \rho_L) \quad (25)$$

Para as válvulas do tipo GLITSCH V-1, os coeficientes mencionados possuem os seguintes valores: $K_{vf} = 5,5$; $K_{va} = 33,0$ e $C_{vp} = 1,25$. Os valores destes coeficientes, foram substituídos nas equações (23) e (24), fornecendo a curva apresentada anteriormente, figura (8).

As velocidades críticas dos Balanços de pontos fechado e aberto, são respectivamente dadas pelas seguintes expressões:

$$V_{vbf} = \sqrt{H_v R_{vp} (C_{vp} / K_{va}) (\rho_{vm} / \rho_v)} \quad (26)$$

$$V_{vba} = \sqrt{H_v R_{vp} (C_{vp} / K_{va}) \rho_{vm} / \rho_v} \quad (27)$$

$$\text{onde: } \frac{V_{vbf}}{V_{vba}} = \sqrt{\frac{K_{va}}{K_{vf}}} \quad (28)$$

Ao se trabalhar na faixa de velocidade $V_{vbf} < V < V_{vba}$, ocorrem dois fenômenos interessantes:

- . Ao crescer a velocidade ΔP mantem-se constante;
- . As válvulas oscilam entre a posição fechada e aberta, não atingindo uma posição estável.

Klein (17), justifica o fenômeno apresentado no primeiro ítem do parágrafo anterior, através da seguinte observação:

" Acredita-se que o movimento oscilatório das válvulas, dissipe energia cinética acarretando um plator

na curva $\Delta P_s \times F_{va}$ ".

Fasesan (10) trabalhando com válvulas do tipo KOCH-T, não obteve uma região de Pressão constante entre os pontos de alance, como previsto pela literatura.

As teorias formuladas até hoje, não possuem um modelo específico para esse tipo de válvula.

Bolles (14) e Klein (17), ao desenvolverem seus modelos tiveram como base os dados para válvulas do tipo GLITSCH-V1. Em ambos os artigos, o modelo apresentado prevê uma região de Pressão constante entre os pontos de alance.

Piqueur e Verholye (18), apresentaram dados experimentais para flexitray tipo T - VENTURI e pratos valvulados tipo GLITSCH A-1 e GLITSCH V-1. Em todos os casos, foram encontrados um gradiente de pressão entre os pontos de Balanços.

2.2.4 - Performance de Prato Valvulado Irrigado

De acordo com Kafarov (16), o gradiente de pressão total em um Prato Valvulado (ΔP_{g-1}) é dado pela soma dos gradientes de Pressão através do Prato seco e através da camada de líquido aerada (ΔP_1), isto é:

$$\Delta P_{g-1} = \Delta P_s + \Delta P_1 \quad (29)$$

Na figura (7), são apresentadas curvas que representam a dependência de ΔP_{g-1} com a velocidade do gás para três cargas de líquido diferentes. Essas curvas foram obtidas para válvulas tipo GLITSCH.

Para avaliar ΔP_{g-1} , utiliza-se uma das expressões para ΔP_s sugeridas por Kafarov, dependendo da carga do fluxo gasoso. São válidas para ΔP_1 as seguintes correlações:

Região II - III:

$$\Delta P_1 = 0,27 (A_o/F_p)^{-0,25} h_w^{0,85} L_{a,c}^{0,35} \quad (30)$$

$$\text{onde: } F_p = 1,2 (2A_d + A_{a,c}) \quad e \quad (31)$$

$$A_{a,c} = 1,1 (t/d_v)^2 A \quad (32)$$

Região I - II:

$$\Delta P_1 = 0,65 \cdot 1,2^{-V_o} (A_o/A_p)^{-0,25} h_w^{0,85} L_{a,c}^{0,35} \quad (33)$$

O uso desta última correlação deve ser feito, apenas em cálculos estimativos a nível de projeto, uma vez que na Região I da curva $\Delta P_{g-1} \times V_o$, as funções hidrodinâmicas são extremamente instáveis.

Bolles (14) também sugere, um método aditivo para avaliação do gradiente de Pressão através de um Prato irrigado; isto é: ΔP_s é somada a queda de Pressão encontrada na espuma:

$$\Delta P_{g-1} = h_s + h_f \quad (34)$$

a queda de Pressão através da espuma pode ser estimada por:

$$h_f = \beta (h_w + h_{ow}) \quad (35)$$

Onde β é o fator de aeração para pratos perfurados.

Klein (17), em seu artigo, critica o modelo proposto

por Bolles, exatamente no que se refere a correlação utilizada para se calcular a queda de pressão através da espuma. Acha conservativo o uso do fator de aeração (β) para pratos perfurados, nessa correlação.

Argumenta que, a forma como fase gasosa entra em contato com a fase líquida, nos dois tipos de pratos é bastante diferenciada. Nos pratos perfurados, o vapor penetra verticalmente na camada de líquido, enquanto que nos pratos valvulados lateralmente.

Tal diferenciação, leva a um fator de aeração menor para os pratos valvulados. (figura 11)

Propõe em contra partida, uma correlação, que apresenta uma precisão em torno de $\pm 24\%$ para o cálculo de ΔP_1 . Esta correlação foi desenvolvida com base em publicações sobre pratos valvulados; figuras (9), (10). Levando-se em consideração esta correlação para o fator de aeração, todas relações desenvolvidas para ΔP_{g-1} dos pratos perfurados são válidas.

Fasesan (10), correlacionou a perda de carga total em um prato valvulado tipo KOCH, com a velocidade de orifício para cinco diferentes vazões de líquido.

Concluiu que ΔP_{g-1} cresce não só com a velocidade de orifício bem como com a vazão do líquido no Prato.

Os dados coletados para baixas vazões de gás, mostram que o fenômeno de gotejamento para o prato anterior é insignificante.

2.3 - Hidrodinâmica de Pratos Mistos

Este tipo de prato tem sido apontado como um equipamento de contato promissor. Combina as propriedades favoráveis dos pratos perfurados e dos valvulados (3), atualmente, vêm sendo empregados, em fase industrial, no Japão e na Alemanha.

Os pratos Mistos estão apresentando bons resultados, em termos funcionais, porém sua eficiência está abaixo da oferecida pelos pratos perfurados. É possível, aumentar significativamente as faixas de operações estáveis e de eficiência através de um melhoramento no design das válvulas (19).

2.3.1 - Performance de Pratos Mistos Secos

Vesnovskii et alli, propuseram um modelo que relaciona o gradiente de Pressão através de um prato Seco (ΔP_s) com a relação G_v/F_o (onde G_v é o peso das válvulas e F_o a área aberta destinado a fase gasosa) e a velocidade de orifício V_o . Esta relação foi obtida empiricamente para o sistema água-ar, a pressão desta equação é de 10%.

$$\Delta P_s = (3,3 + 0,026 \frac{G_v}{F_o}) V_o^{1,45} \rho_g^{0,725}$$

2.3.2 - Performance de Pratos Mistos Irrigados

As investigações sobre a hidrodinâmica dos pratos mistos, realizadas por Vesnovskii et alli, indicam que este tipo de prato pode operar em regime correspondente aos pratos perfurados (válvulas fechadas) bem como em regime correspondente aos pratos valvulados.

O gradiente de pressão em um prato irrigado (ΔP_{g-1}) pode ser definido como a soma da gradiente de pressão seco (ΔP_s) do gradiente de pressão referente a tensão superficial (ΔP_σ), ou seja:

$$\Delta P_{g-1} = \Delta P_s + \Delta P_\sigma$$

onde $\Delta P_\sigma \rightarrow$ é calculado através de expressões propostas para pratos perfurados.

A partir de dados experimentais correlacionados, propuseram o seguinte modelo: com \pm 15% de precisão

$$\Delta P_{g-1} = \frac{\rho L}{1000} \left[250 - 73,5 (W \sqrt{\rho_g})^2 \right] C_1$$

onde

$$C_1 = 2,8 (L/Q)^{1,6} \rightarrow \frac{L}{Q} = 0,2 - 0,525$$

$$C_1 = 1 \rightarrow \frac{L}{Q} = 0,525 - 1,63$$

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

A figura 1 apresenta as três partes que formam o formam o protótipo construído para simular um estágio ou um prato de uma torre de separação.

A parte central apresentada na figura 1, esquematiza o prato construído. Consiste de uma chapa retangular de acrílico transparente e com a seguinte dimensão: 21,5 cm de largura, 78,6 cm de comprimento e 0,32 cm de espessura. É dotada de uma represa e de um vertedoro de PVC de diâmetro interno igual a 3,15cm e cujo deslocamento vertical é regulável, permitindo desta maneira, controlar-se o nível da camada de líquido que escoar no prato.

A parte inferior da figura 1, representa um reservatório em acrílico, de forma evazada por onde entra o gás (ar) proveniente de três compressores. A forma evazada do reservatório, assim como uma calha de PVC, colocada na entrada do gás, foram utilizadas para uniformizar a distribuição do fluxo gasoso. Para tomada de pressão, foi acoplado ao reservatório um manômetro em forma de U.

A parte superior do equipamento montado, consiste de um tampo de 19 cm de altura. Do lado reservado para alimentação de líquido, existe um placa de altura variável, que atua como uma represa garantindo um escoamento uniforme do

líquido acima do prato.

Entre cada uma destas três partes do equipamento en con tra m se fitas de borracha que permitem uma vedação per fe ita do sistema.

O prato construído, foi elaborado com a versatibilidad e de poder operar como prato perfurado, valvulado e misto, bastando portanto lançar mão de um simples lacre nas diver sa s perfurações existentes, com fita adesiva.

As válvulas empregadas são retangulares em aço inoxi dá vel, de dimensão 3x2 cm². Suas hastes sustentadoras são cilíndricas em ferro niquelado. Tais hastes constituem os pés das válvulas, que possuem um comprimento de 3,5 cm.

O prato elaborado é provido de 15 válvulas, dispostas em 5 filas de três. Cada válvula fica centralizada acima de um furo principal de diâmetro interno igual a 3,17mm. Os dois pés das válvulas, permitem um deslocamento vertical va ri á vel através de dois pequenos orifícios. Dois anéis de bor ra cha, colocados nas extremidades dos pés limitam o desloca men to das válvulas.

Entre cada fila de válvulas estão distribuídos dois conjuntos de perfurações, totalizando oito em todo prato. Cada conjunto contém sete perfurações arranjadas em forma hexagonal centrada. O diâmetro da perfuração central é de 3.17mm e os diâmetros dos demais são iguais a 2mm.

3.1 - Equipamentos de Apoio

Para o funcionamento do prato e obtenção dos dados, foram agregados ao sistema construído, os seguintes equipamentos:

- . 02 Compressores Trifásicos do tipo FT2, com capacidade de 1,0 CV e frequência de 3600 RPM, fabricados pela JOMAR - Brasil;
- . 01 Compressor Trifásico do tipo FT1, com capacidade de 3/4 CV e frequência de 3600 RPM, fabricado pela JOMAR - Brasil;
- . 01 Rotâmetro CALQFLOR, de capacidade de 40 l/min, fabricado pela BLUE WHITE AND WESTMINSTER C.A.-USA, para medição do fluxo gasoso;
- . 01 Rotâmetro CALQFLOR, de capacidade de 4 l/min, fabricado pela BLUE WHITE AND WESTMINSTER C.A. - USA, para medição do fluxo de líquido.

3.2 - Metodologia Experimental

O sistema bifásico empregado para se avaliar a hidrodinâmica dos pratos propostos, foi água-ar.

O fluxo de ar é fornecido por três compressores, dispostos em série e o fluxo de água pela rede de abastecimento local, sem nenhum tratamento laboratorial.

A alimentação do líquido é feita a partir de um reservatório mantido a nível constante.

O prato construído, sendo versátil, ofereceu a possibilidade de se trabalhar com diversos tipos de configurações, isto é:

- 1 - Prato Valvulado (PV)
- 2 - Prato Perfurado com 1 furo (PF1)
- 3 - Prato Perfurado com 3 furos (PF3)
- 4 - Prato Perfurado com 5 furos (PF5)
- 5 - Prato Perfurado com 6 furos (PF6)
- 6 - Prato Perfurado com 7 furos (PF7)
- 7 - Prato Misto-Válvula + 1 furo (PM1F)
- 8 - Prato Misto-Válvula + 3 furos (PM3F)
- 9 - Prato Misto-Válvula + 5 furos (PM5F)
- 10 - Prato Misto-Válvula + 6 furos (PM6F)
- 11 - Prato Misto-Válvula + 7 furos (PM7F)

Para tal, partindo-se do conjunto das válvulas e das perfurações existentes no prato inicial e de lacres com fita adesiva, obtinha-se a configuração desejada.

Uma vez definida a configuração do Prato, efetuava-se as medidas dos parâmetros hidrodinâmicos, ou seja do gradiente de pressão através do prato seco (ΔP_s) e do gradiente de pressão através do prato irrigado ou molhado (ΔP_{g-1}).

As medições dos parâmetros mencionados no parágrafo acima, foram realizadas nas faixas de vazão de 18,431/h até 58,4 l/h para o líquido e 9020 até 4860 l/h para o gás.

As medidas do gradiente de Pressão através do Prato seco (ΔP_s), foram obtidas para cada configuração, variando-se a vazão da fase gasosa dentro da faixa mencionada previamente, tomando-se o cuidado de esperar a estabilização do

sistema à cada nova vazão do gás.

Com o prato molhado, variava-se a acumulação de líquido no mesmo, dependendo da altura do vetedoro estipulada. Trabalhou-se com quatro diferentes alturas de líquido no prato, sendo a faixa de variação deste parâmetro de 1 até 4 cm.

Para cada tipo de configuração, procurou-se investigar a influência dos parâmetros abaixo relacionados, sobre o gradiente de pressão ΔP_{g-1} ,

- . Altura da camada no prato;
- . Vazão do líquido;
- . Vazão do Gás.

Com o objetivo de se observar a influência do peso das válvulas, para cada configuração, esse parâmetro foi modificado quatro vezes, realizando-se em seguida as medições dos ΔP_{g-1} .

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, procurou-se investigar a influência das vazões do líquido e do gás, da altura da camada líquida que escoava no prato, do peso das válvulas e do número de orifício, sobre os parâmetros hidrodinâmicos (ΔP_s , ΔP_{g-1} , coeficiente de arraste) dos Pratos Perfurados, válvulados e Mistos.

Uma observação visual durante o funcionamento dos diversos pratos mencionados, revela os seguintes aspectos:

- . Um escoamento preferencial do líquido, localiza-se na região lateral do equipamento, entre a região de borbulhamento e as paredes do tampo;
- . Esse escoamento preferencial, aumenta de intensidade com a vazão da fase líquida e com a altura da camada de líquido no prato;
- . Quando se opera com altas vazões de líquido e de gás, aparece o fenômeno denominado BACK-MIXING isto é, um movimento por parte do líquido, oposto ao escoamento. Esse fenômeno não foi explorado nesta pesquisa.

4.1 - Pratos Perfurados

4.1.1 - Pratos Perfurados Secos

A tabela 1, refere-se aos dados coletados para o gradiente de Pressão através dos pratos perfurados secos em função da vazão da fase gasosa, tendo como fator limitante a configuração do Prato.

Dessa tabela, foram construídas as curvas encontradas na figura 12, e obtidos os coeficientes de arraste para os diversos Pratos Perfurados.

As curvas sugerem uma relação geométrica entre os dois parâmetros analisados, para todos os tipos de pratos, isto é:

$$\Delta P_s = A G^n$$

Para elucidar esse fato, foram realizadas regressões a partir dos dados obtidos, que levaram aos seguintes resultados:

Prato	Índice da curva (n)	Coef. da curva (A)	r
PF1	1,48	$1,65 \cdot 10^{-3}$	0,993
PF3	1,59	$7,69 \cdot 10^{-4}$	0,996
PF5	1,80	$1,09 \cdot 10^{-4}$	0,997
PF6	1,74	$1,43 \cdot 10^{-4}$	0,997
PF7	1,89	$4,91 \cdot 10^{-5}$	0,999

Arnold et alii (4), encontraram que ΔP_s pode ser cor relacionado com a velocidade de orifício (V_o) através da ex pressão $\Delta P_s = K V_o^{1,8}$.

A velocidade de orifício pode ser obtida dividindo-se a va zão volumétrica do gás pela área total das perfurações exis tentes no prato.

Com relação ao expoente (n) da curva proposta por a queles pesquisadores, foram encontrados desvios da ordem de 17,77% e 11,67% para os pratos PF1 e PF3, respectivamente. Pa ra os demais pratos, o desvio situa-se na faixa de 5%.

A causa dessa diferença encontrada na ordem dos des vios para os pratos PF1 e PF3, está na parca des tribuição dos orifícios sobre os referidos pratos.

Ainda sobre a proporcionalidade entre os parâ metros ΔP_s e Q, foi observado que a curva que representa o prato PF5, possui o expoente (n) maior em relação ao re presentado pelo prato PF6. Este fato é justificado pela não unifor midade na dimensão dos diâmetros dos orifícios.

Os dados experimentais para ΔP_s , também foram utiliza dos na tentativa de avaliar os coeficientes de orifício para cada prato, utilizando a seguinte expressão (20).

$$\Delta P_s = \frac{1}{2g} \frac{\rho L}{\rho_g} \left(\frac{V_o}{C_o} \right)^2$$

Não foi encontrado um comportamento uniforme na curva $C_o \times V_o$. O coeficiente de orifício para os tipos de pratos perfurados estudados, varia entre 1,50 - 2,50 . Tal com portamento deve ser relacionado ao fato de que, a equação a cima citada, refere-se a um prato totalmente per furado

em sua área ativa. Isto limita a utilização dessa equação, neste caso, visto que o prato tipo 'perfurado' não apresenta uma distribuição uniforme das perfurações na totalidade dessa área.

4.1.2 Pratos Perfurados Irrigados

A performance dos pratos perfurados irrigados, está caracterizada nas tabelas 2 a 6. Estas tabelas, apresentam os valores obtidos para ΔP_{g-1} versus vazão do gás, tendo como parâmetro a altura da camada de líquido que escoar sobre o prato.

A influência desse parâmetro sobre ΔP_{g-1} , é observada ao compararmos os valores obtidos para as alturas de líquido de 2 a 4 cm, com os encontrados para a altura de 1 cm de líquido. Foi encontrado que, a diferença entre estes valores é aproximadamente igual a camada hidrostática de líquido no prato.

Durante a coleta de dados, foi variada a vazão do líquido, trabalhou-se com três vazões diferentes.

A influência desse parâmetro sobre ΔP_{g-1} , é praticamente insignificante, levando a uma sobreposição de pontos. Este fato, permitiu tratar os dados através de uma média aritmética.

Quando os pratos funcionam à baixa vazões de gás, observa-se que o fenômeno de gotejamento está presente. A intensidade deste fenômeno, aumenta à medida que cresce o número

mero de orifícios para formar um novo tipo de prato perfurado.

A interação entre as fases líquida e gasosa nos pratos PF1 e PF3, dá-se através de regime de jatos sem a formação de espuma. Nos pratos restantes (PF5, PF6, PF7), o borbulhamento é intenso, proporcionando um bom contato entre as fases, ocasionando uma camada extensa de espuma sobre o prato.

4.2 - Pratos Valvulados

A hidrodinâmica dos pratos valvulados foi estudada sob a ótica de como o peso das válvulas que compõem os pratos, influenciariam os parâmetros ΔP_s , ΔP_{g-1} e o coeficiente de arraste.

Trabalhou-se com válvulas de quatro pesos diferentes, ou seja, válvula A, B, C, D com pesos de 3,90g, 5,00g, 6,06g, 7,01g, respectivamente.

Essas válvulas originaram os seguintes pratos valvulados:

- . PVA → Prato valvulado cujas válvulas pesam 3,90g
- . PVB → Prato valvulado cujas válvulas pesam 5,00g
- . PVC → Prato valvulado cujas válvulas pesam 6,06g
- . PVD → Prato valvulado cujas válvulas pesam 7,01g

4.2.1 - Pratos Valvulados Secos

A tabela 7, compara os valores obtidos para ΔP_s em cada prato, para diversas vazões do gás. Observa-se que dentro da faixa de vazão do gás que se trabalhou, há um aumento discreto nos ΔP_s com o aumento do peso das válvulas.

A partir das curvas ΔP_s versus Q (figura 12), foi verificado um comportamento uniforme entre esses parâmetros, contrariando a citação de Kafarov (16) e mostrado na figura 7. Dentro das condições de operação desta pesquisa verifica-se que ΔP_s cresce com a vazão do gás porém a curva que representa este comportamento, situa-se na região I, citada literatura, isto é: na região onde as válvulas estão fechadas. Este comportamento é devido a baixa potência oferecida pelos compressores.

Nos limites em que se trabalhou, para as vazões de gás, pode-se representar a queda de pressão através de um prato valvulado seco pela seguinte expressão:

$$\Delta P_s = D + K_{vf} \frac{\rho_v}{\rho_L} \frac{V_o^2}{2g}$$

onde K_{vf} é o mesmo coeficiente de balanço fechado proposto pelo modelo de Bolles para performance de pratos valvulados secos (14).

Através de regressão linear, obteve-se os seguintes valores para os coeficientes D e K_{vf} .

Prato	KV_f	D	r
PVA	0,39	0,0240	0,994
PVB	0,56	0,0196	0,995
PVC	0,58	0,0225	0,996
PVD	0,67	0,0220	0,998

O modelo de Bolles (1) prevê uma região em que ΔP_s é constante entre os pontos de balanço fechado e aberto. Não foi encontrada uma região com esta característica quando se trabalhava com os pratos valvulados. Possivelmente, esse comportamento apresentado pelo PV, deve-se ao design das válvulas e do próprio prato.

4.2.2 - Pratos Valvulados Irrigados

Para se avaliar a performance dos pratos valvulados irrigados, variando-se a vazão do gás, foram colhidos dados de ΔP_{g-1} para três vazões de líquido, em quatro diferentes alturas da camada de líquido.

Nos pratos valvulados, algumas válvulas oscilam entre uma posição média, ao se trabalhar a baixas vazões de gás, com camadas líquidas de 1 e 2 cm de altura.

Esse comportamento instável que as válvulas apresentam, torna-se mais intenso com o aumento do peso das válvulas; pode ser evidenciado através das seguintes observações visuais:

- . Prato A: As válvulas abrem para todas vazões do gás e alturas da camada líquida;
- . Pratos B-C: À medida que se aumenta o peso das válvulas, a tendência destes dispositivos é de permanecerem parcialmente abertos ou trepidando sobre o prato. À medida que a vazão do gás aumenta, o comportamento das válvulas torna-se mais estável, apresentando uma posição média de equilíbrio.

Os dados brutos de ΔP_{g-1} , obtidos para cada vazão de líquidos, foram submetidos a uma média aritmética, uma vez que não apresentavam flutuações consideráveis.

Os dados, desta maneira tratados, podem ser encontradas nas tabelas 8 a 10.

A influência da camada líquida sobre o gradiente de pressão através do prato PVA, está apresentado na figura(13).

Nessa figura, as curvas mostram-se praticamente paralelas. Distam uma das outras ± 1 cm, distância esta, que é praticamente a diferença entre as alturas da camada líquida sobre o prato. Este deslocamento das curvas, deve-se ao fato da camada líquida acrescer sua altura ao gradiente de pressão através do prato seco mais gradiente de pressão necessário para aerar o líquido.

Para os pratos B-C, foram representadas graficamente a relação $\Delta P_{g-1} \times Q$, apenas para as duas camadas líquidas externas (1-3cm), figura (14). As curvas, não são paralelas, havendo trechos onde a distância entre elas é superior as camadas hidrostáticas do líquido. Nesses trechos, a

contribuição do gradiente de pressão necessário para aerar o líquido a ΔP_{g-1} é bem maior que no prato valvulado A.

A influência do peso das válvulas sobre ΔP_{g-1} , está representado na figura 14. Observa-se que:

. Para camada líquida de 1cm de altura, ΔP_{g-1} diminui com o aumento do peso das válvulas, exceto para vazões do gás menores que $25\text{m}^3/\text{h}$, onde aquele parâmetro para o prato PVC é maior do que para PVA. Nesta vazão do gás, a curva para PVC corta a curva para PVA, apresentando comportamento inverso

Para camada líquida de 4cm de altura, a curva que representa ΔP_{g-1} para o prato PVA para vazão do gás acima de $19,60\text{ m}^3/\text{L}$, está situada entre as curvas referentes aos pratos mais pesados.

O comportamento apresentado pelo prato PVB, deve-se ao fato de que neste prato as oscilações das válvulas são intensas mascarando a verdadeira posição de equilíbrio do sistema.

Trabalhando-se com os pratos valvulados não foi verificado o fenômeno de gotejamento.

O contato entre as fases, a baixa vazões de gás, é realizado através de jatos com pouca espuma.

À medida que se aumenta a vazão e diminui-se o peso das válvulas, um regime de dispersão instala-se no prato, proporcionando um borbulhamento intenso conseqüentemente um bom contato entre as fases.

4.3 - Pratos Mistos

Os pratos mistos, híbridos dos perfurados e dos valvulados, tiveram sua performance avaliada sob o mesmo prisma que os seus precurssores.

Em termos de coleta de dados, a vazão do gás, a vazão do líquido, a altura da camada líquida e o peso das válvulas para as diversas configurações mencionadas no Capítulo 1, foram as principais variáveis.

Com relação as configurações possíveis, estudou-se cinco tipos. Para cada um deles, variou-se o peso das válvulas. A seguir os tipos estudados:

Prato	Configuração	Peso da Válvula(g)
PM1FA		3,90
PM1FB	1 Furo	5,00
PM1FC		6,00
PM1FD		7,01
PM3FA		3,90
PM3FB	3 Furos	5,00
PM3FC		6,06
PM3FD		7,01
PM5FA		3,90
PM5FB	5 Furos	5,00
PM5FC		6,06
PM5FD		7,01

Prato	Configuração	Peso da Válvula(g)
PM6FA		5,90
PM6FB	6 Furos	5,00
PM6FC		6,00
PM6FD		7,01
PM7FA		3,90
PM7FB	7 Furos	5,00
PM7FC		6,00
PM7FD		7,01

4.3.1 - Pratos Mistos Secos

Os dados obtidos para ΔP_s dos pratos mistos estão nas tabelas 11, 17, 23..

Para os pratos Mistos A, foram construídas curvas que mostram a influência do número de orifício em cada prato. Fig.12

À medida que cresce o número de perfurações para se formar um novo prato, o gradiente de pressão através dos pratos mistos secos, diminui. Com exceção dos pratos PM5F e PM6F, que exibem uma sobreposição de valores figura (14). As relações diâmetro e disposição dos orifícios, nesses dois pratos, justificam discrepâncias encontradas.

A expressão proposta para se avaliar ΔP_s através dos pratos valvulados, baseada no modelo de Bolles (14), também foi utilizada para os pratos mistos. Os valores de D e K_{vf}

para os diversos pratos mistos, são expressos nas tabelas seguintes:

Prato	K_{vf}	D	r
PM1FA	0,51	0,0103	0,99
PM1FB	0,72	0,0082	0,98
PM1FC	0,95	0,0072	0,99

Prato	K_{vf}	D	r
PM3FA	0,44	0,0084	0,99
PM3FB	0,78	0,0040	0,99
PM3FC	0,98	0,0023	0,99

Prato	K_{vf}	D	r
PM5FA	0,51	0,0039	0,99
PM5FB	0,62	0,0026	0,99
PM5FC	0,64	0,0026	0,99

Prato	K_{vf}	D	r
PM6FA	0,45	0,0056	0,99
PM6FB	0,66	0,0024	0,99
PM6FC	0,58	0,0019	0,99

Prato	K_{vf}	D	r
PM7FA	0,53	0,0024	0,99
PM7FB	0,75	0,0001	0,99
PM7FC	0,58	0,0011	0,98

Com base nos resultados expostos, tem-se que a influência do peso das válvulas é mais acentuada que a do número de orifício nas configurações com 1 e 3 furos. O que leva, a crê que nestes pratos, predominam as características das válvulas.

Para os outros pratos, a influência do peso das válvulas e do número de orifício é discreta, proporcionando um coeficiente de balanço fechado na faixa de 0,5 - 0,6.

Os parâmetros propostos pelo modelo de VESNOVSKII et alii (1), para se avaliar o gradiente de pressão através de um prato misto seco, foram aplicados aos dados referentes aos diversos pratos mistos estudados nesta pesquisa. Anali

sando os resultados obtidos, pode-se sugerir a expressão seguinte:

$$\Delta P_s = D_1 + D_2 \frac{G}{F_0} v_o^{n_2} \rho 0,725$$

onde D_1 , D_2 , n_2 são apresentados na tabela.

Prato	D_1	D_2	n_2	r
PM1FA	-0,0015	0,000037	1,23	0,998
PM1FB	0,0004	0,000033	1,22	0,995
PM1FC	-0,0002	0,000030	1,19	0,996

Prato	D_1	D_2	n_2	r
PM3FA	0,00070	-0,000023	1,34	0,999
PM3FB	-0,00003	0,000017	1,37	0,999
PM3FC	0,00124	0,000023	1,26	0,999

Prato	D_1	D_2	n_2	r
PM5FA	-0,00027	0,000015	1,57	0,998
PM5FB	0,00019	0,000011	1,53	0,999
PM5FC	-0,00026	0,000010	1,57	0,997

O modelo proposto foi testado para Pratos mistos em todas as configurações possíveis, porém as únicas que apresentaram resultados coerentes foram apenas as configurações com 1, 3, 5 furos.

4.3.2. Pratos Mistos Irrigados

A performance dos pratos mistos, é influenciada por suas válvulas e seus orifícios. Como nos pratos valvulados, região de instabilidade ou oscilações das válvulas nos pratos estão presentes a medida em que se aumenta o número das perfurações para se formar uma nova configuração. Ao aumentar-se o peso das válvulas, é comum que estas permaneçam fechadas ou parcialmente abertas.

Os pratos Mistos PM1FA, PM3FA, PM5FA, apresentam todas as válvulas abertas, em todas as condições de operação. A amplitude e a estabilidade que as válvulas alcançam, crescem diretamente com a vazão do gás e com a camada líquida que escoar sobre o prato bem como a velocidade desta camada.

Para os pratos PM6FA e PM7FA a instabilidade das válvulas é grande. Devido a distribuição do gás em cada prato, nem todas as válvulas abrem nestes pratos. Desta forma, o carácter de Prato perfurado predomina.

Com o aumento do peso das válvulas a influência da camada de líquido que escoar sobre o prato, torna-se grande. As válvulas, para qualquer vazão do gás, apenas trepidam pa

ra os pratos mistos B quando a altura da camada líquida é de 1 e 2 cm; porém 80% das válvulas apresentam-se parcialmente abertas quando a altura da camada líquida é de 3 e 4 cm.

Com os pratos mistos C, observa-se que as válvulas são demasiadamente pesadas, para operarem abertas, seja qual for a condição de funcionamento imposta.

O efeito da camada de líquido que escoava sobre o Prato Misto A, é mostrado nas figuras 15 a 19; sendo essas figuras baseadas nas tabelas 12 a 16. Para os demais pratos, esse efeito apenas foi investigado para as camadas de líquido de 1 e 4 cm; figuras 20 a 24. As coordenadas para esta representação gráfica, foram tiradas das tabelas previamente estabelecidas.

As curvas ΔP_{g-1} versus Q exibidas nas figuras citadas no parágrafo anterior, apresentam uma mudança de inflexão para uma vazão do gás de aproximadamente $25\text{m}^3/\text{h}$. Tornam-se mais alongadas à medida que aumenta a camada líquida sobre o prato. Essa característica encontrada nos pratos mistos, torna-se menor acentuada ao mudar-se de uma configuração para outra, ou seja com o aumento do nº de orifícios no prato.

A justificativa para o comportamento mencionado acima, está na correlação de forças que atuam em cada válvula no prato. Os pesos da válvula e da camada líquida, resultante da pressão do gás a força de atrito referente ao escoamento da mistura líquido-gás ao redor e sobre a válvula; são as forças que atuam em cada válvula.

A complexidade apresentada pela hidrodinâmica dos pratos valvulados e mistos, deve-se exatamente a presença dessa correlação de forças nos pratos. Fato que não ocorre nos

pratos perfurados.

À medida que o peso das válvulas aumenta, a tendência é que, em vez de um sistema em equilíbrio, exista uma força resultante na direção da força peso. Conseqüentemente, a resposta da válvula ao sistema, é repousar ou trepidar sobre o prato; sendo a fase gasosa distribuída para camada líquida, principalmente através das perfurações existentes. Esse comportamento, também é verificado para válvulas mais leves quando se aumenta o número de orifício no prato, isto é, mudando-se de configuração, sendo mais acentuado com o aumento do peso da válvula.

As figuras 15 a 19. para o prato **A** e as 20 a 24 para os pratos **B** e **C**, assim como as observações visuais respaldam a justificativa anterior. Nestas figuras observam-se que:

- . Para os pratos PM1FA, PM3FA, os dados são quase sobrepostos, apresentando mudança de inflexão,
- . Para os pratos PM5FA, PM6FA, os dados sobrepõem-se entre si, porém estão abaixo dos encontrados para os pratos PM1FA, PM3FA. As curvas apresentadas para o prato PM6FA são mais alongadas que as respectivas para PM5FA;
- . Para os pratos PM6FA e PM7FA, não há sobreposição de dados. As curvas para aquele prato, estão abaixo das respectivas para PM6FA e são bem mais alongadas;
- . Para os pratos **B** e **C**, o efeito da camada de líquido sobre ΔP_{g-1} , mostra-se similar ao encontrado para os pratos **A**, porém as curvas apresentam uma concavidade

dade bem mais acentuada para as configurações de 1 e 3 furos.

A influência do peso das válvulas sobre o gradiente de pressão (ΔP_{g-1}), foi avaliada para camadas de líquido de 1 e 4 cm.

As figuras 20 a 24, mostram a relação existente entre os dados obtidos para os diversos pratos mistos avaliados.

Mesmo diante da instabilidade nas leituras, geradas pelas oscilações das válvulas em alguns pratos, analisando aquelas figuras destacam-se as seguintes observações:

- . Para altura da camada líquida de 1 cm, a influência do peso das válvulas sobre ΔP_{g-1} , é pequena. Por serem mais leves, os pratos mistos **A** apresentam ΔP_{g-1} menores e curvas bem definidas. Há cruzamento de curvas e sobreposição de dados para os pratos **B** e **C**, devido as oscilações das válvulas para todas as vazões do gás em que se trabalha;
- . Para altura da camada líquida de 4 cm, o efeito do peso das válvulas sobre ΔP_{g-1} , é bem mais acentuado. As curvas são bem mais definidas. ΔP_{g-1} para os pratos Mistos **A** são menores, a tendência é deste parâmetro crescer com o peso das válvulas.

Da literatura sabe-se que o gradiente de pressão através de um prato (3), é dado pelo somatório de ΔP_L e $\Delta P\sigma$. Conclui-se que para uma mesma camada de líquido responsável por ΔP_L , torna-se maior o parâmetro $\Delta P\sigma$ ou seja mais energia é necessária para se aerar o líquido, formar a espuma e promover um bom contato entre as fases; à medida que se au

menta o peso das válvulas.

O fenômeno do gotejamento, está presente discretamente nos pratos mistos. Esta herança dos pratos perfurados, praticamente não aparece nos pratos de configurações 1 e 3. A baixas vazões do gás, os demais pratos apresentam fenômeno, que se torna mais intenso com o aumento de orifícios no prato e com o aumento do peso das válvulas para uma mesma configuração. O contato entre as fases é dado através do regime de dispersão com uma densa camada de espuma.

4.4 - Comparação entre os Pratos

Os pratos mistos, como foi definido anteriormente, são híbridos dos pratos valvulados e perfurados. Foram propostos, com objetivo de agregar as vantagens de seus predecessores, favorecendo faixas mais estáveis de trabalho e economia em termos de design e operabilidade.

Em face, ao objetivo de sua concepção, é mister que na parte final deste trabalho, seja apresentado um paralelo entre os pratos mistos e os demais pratos avaliados, isto é:

- Os pratos mistos secos apresentam valores de ΔP_s menores que os dos valvulados e perfurados de mesma configurações. A diferença entre ΔP_s para Mistos e perfurados, diminui consideravelmente nos pratos PM5F, PM6F, PM7F.

O aumento do peso das válvulas também leva a uma diminuição entre os ΔP_s dos pratos em questão;

- Quanto ao Modelo de Bolles (14), tem-se que o ponto de balanço fechado (K_{Vf}) para os Pratos Mistos aumenta à medida que cresce o nº de orifícios no prato. Portanto os pratos Mistos passam a funcionar como pratos perfurados com orifícios pequenos ,
- A mudança de comportamento apresentado pelos pratos valvulados, ao serem introduzidas perfurações para formar os pratos mistos, é deveras pronunciada nos pratos mais leves (A). Ao se comparar as curvas $\Delta P_{g-1} \times Q$ para estes pratos, figuras 26 a 29, observa-se que o caracter dos PV, está fortemente presente nas configurações de 1 e 3 furos. A partir do ponto em que a vazão do gás é da ordem de $25m^3/h$, as distâncias entre as três curvas são relevantemente consideráveis, atendendo as espectativas dos objetivos desta pesquisa. Para os pratos com válvulas mais pesadas (B e C), porém esse efeito é bem menos acentuado, figuras 29 a 30. Nas demais configurações, apesar de apresentarem uma redução considerável nos valores de ΔP_{g-1} , o caracter de prato valvulado quase não está presente. O efeito das perfurações é bem mais acirrado; crescendo com o aumento do peso das válvulas;
- As figuras 29 a 30, apresentam uma comparação entre ΔP_{g-1} para os pratos misto (A,B,C) e os perfurados nas mesmas configurações.

Nas configurações com 5,6 e 7 furos o caracter de prato perfurado é bastante acentuado. Esses pratos istos oferecem valores para ΔP_{g-1} na mesma ordem que os pratos perfurados de mesma configuração; para uma mesma vazão do gás. No entanto, os pratos PM1F e PM3F oferecem um comportamento bastante afastado do comportamento dos pratos PF1 e PF3.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Mediante análise dos dados obtidos em diferentes condições da camada líquida que escoava sobre um prato, vazões de líquido, de gás, e de peso das válvulas, pode-se concluir que:

- . O gradiente de Pressão através de um prato seco é diretamente proporcional a vazão do gás, seguindo uma relação geométrica para os pratos perfurados, dada pela expressão: $\Delta P_s = A G^n$, com n na faixa de 1,8;
- . A expressão $h = \frac{1}{29} \frac{\rho_L}{\rho_g} \left(\frac{V_o}{C_o} \right)^2$, não é uma das melhores para se obter os valores do coeficiente de arraste (C_o) para os pratos perfurados estudados;
- . ΔP_s através dos pratos valvulados e mistos, pode ser representado pelos seguintes modelos:

$$\Delta P_s = D + K_{vf} \frac{\rho_v}{\rho_L} \frac{V_o^2}{2g} \quad (\text{Baseado no modelo de Bolles})$$

$$\Delta P_s = D_1 + D_2 \frac{G}{F_o} v_o^{n_2} \rho^{0,725} \quad (\text{Baseado no modelo de Vesnovsk II})$$

Para os pratos mistos, cujo o último modelo se aplica, os valores de D_1 são desprezíveis.

- . A influência da vazão do líquido sobre ΔP_{g-1} é mínima, porém a contribuição daquele parâmetro para que o regime de funcionamento dos pratos valvulados e misto seja estável, é fundamental;

- . À medida que o peso das válvulas aumenta, os pratos valvulados passam a operar como pratos perfurados de orifícios pequenos, independentemente das condições de operação impostas ao sistema;
- . À medida que se aumenta o peso das válvulas e o nº de orifícios num prato misto, mais próximo do comportamento de pratos perfurados, ele se apresenta;
- . Mesmo se tendo em mente, que o sistema com o qual se trabalhou necessita ser otimizado, pode-se concluir que para nossas condições, os pratos mistos nas configurações de 3 e 5 furos, atendem aos objetivos primordiais de nossa pesquisa, isto é:
 - * Apresentam valores de ΔP_{g-1} entre os referentes para seus predecessores e bem mais abaixo que os valores obtidos para pratos valvulados na mesma configuração;
 - * Apresentam uma faixa de operabilidade bem mais ampla que a dos perfurados, diminuindo consideravelmente a presença de gotejamento durante seu funcionamento a baixa vazão.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA PESQUISAS VINDORAS

Para melhoria do equipamento utilizado e permitir assim um estudo mais detalhado e completo sobre a estrutura dos pratos mistos, os seguintes pontos poderão contribuir para este fim:

1. Modificar o sistema de distribuição da fase gasosa, uma vez que algumas características apresentadas pelos parâmetros estudados, foram conseqüências do sistema utilizado;
2. Suportar as válvulas acima de fendas retangulares em toda sua extensão;
3. Modificar o design das válvulas, mantendo sua forma retangular, seu peso na faixa de 4-5g;
4. Introduzir no sistema alguns manômetros, em posições estratégicas, para possibilitar o estudo da formação da camada de espuma e da altura da camada líquida clara (clear liquid);
5. Realizar estudo de transferência de massa por exemplo, através, da dosagem de cloro livre que se desprende durante a aeração da camada líquida, e comparar a eficiência obtida para cada prato, inclusive com os pratos valvulados e perfurados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SMITH, B. "Design of Equilibrium Stage Process" caps. 14 e 15, McGraw-Hill - Nova York, Ed.: 1963.
2. CAREY, Y.S. et alii., Trans. Aiche, 30:504 (1933)
3. TYUTYUNNIKOV, A.B. Chem. Pet.Eng., 14 (1-2), 31-33(1978)
4. ARNOLD, D.S., et alii., Chem. Eng. Prog., 48:12, (1952)
5. MCALISTER, R.A. et alii., Chem. Eng. Sci, 9:25, (1958)
6. SMITH, P.L. & VAN WINKLE, M. Aiche J. 4:266 (1958)
7. KOLODZIE, P.A. & VAN WINKLE, M. Aiche J. 3:305 (1)(1957)
8. EDULYEE, H.E.: Br. Chem. Eng., 3 (Jan), 14 (1958)
9. PINCZENWSKI, W. V. et alii - Aiche J. 21 (6), 1210(1975)
10. FASEASAN, O.L. Ind. Eng. Chem. Res., 26; 2114, (1987)
11. HUTCHINSON, M. H. et alii - Am. Inst. Chem. Eng. paper, Los Angeles Meeting (Março, 1949).

12. FOSS, A.S. & GERSTER, J.A: Chem. Eng. Progr, 52:28-j
(1956)
13. NORMAN, W.S. & GROCOTT, G.J. Trans. Instn. Chem. Engrs.
39:305 (1961)
14. BOLLES, W.L. Chem. Eng. Prog.
15. BILLET, R. et alii - Ind. Chem. Eng. (Londres) 32:111
(1969)
16. KAFAROU, V. "Fundamentals of Mass Transfer" - cap. 17 ,
Mir Publishers - Moscow, 1^a Ed.: (1975)
17. KLEIN, G.F.: Chem. Eng., may:3,82(1982)
18. PIQUEUR, R.H., & VERHOEYE, L. Can. J. Chem. Eng. 54 (Ju
nho): 177 (1976)
19. VESNOUSKII, V.S. et alii - Chem. Pet. Eng., 15 (5-6) ,
343-346 (1979)
20. VAN WINKLE, M. "Distillation" - Mc Graw Hill-New York(1967)
21. ROBIN, B.J. Br. Chem. Eng. Yun. :351-354 (1959)
22. MAYFIELD, F.D. et alii - Ind. Eng. Chem. 44 (9) set
(1952)

23. BILLET, R. Br. Chem. Eng. 14 (4); 489 (1969)
24. EDULYEE, H.E.: Chem. Eng. March, 123 (1972)
25. BELLET, R., "Distillation Engineering - Chemical Publishing Co. - New York (1979).

APÊNDICE - A : TABELAS

Tabela 1 - Gradiente de Pressão através de Prato Perfurado Seco (cmH₂O)

Prato Q (m ³ /h)	PF1	PF3	PF5	PF6	PF7
9,02	3,9	2,3	0,5	0,7	0,3
13,54	8,7	5,3	1,3	1,4	0,7
19,60	14,1	8,9	2,4	2,4	1,3
25,30	20,7	13,1	3,8	3,8	2,3
32,30	25,8	19,9	5,3	5,7	3,5
39,60	-	24,3	8,1	9,3	5,3
48,60	-	-	11,0	13,6	7,0

Tabela 2 - Gradiente de Pressão através de Pratos Perfurado Irrigado (cmH₂O) (PF1)

h/cm) Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	6,63	8,63	8,83	9,73
13,54	13,50	14,67	15,63	15,67
19,60	20,13	21,40	22,23	23,57
25,30	28,07	28,63	28,23	29,87
32,30	-	-	-	-

Tabela 3 - Gradiente de Pressão através de Prato Perfurado
Irrigado (cmH₂O) (PF3)

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	4,97	6,03	7,00	7,97
13,54	8,07	9,47	10,50	11,20
19,60	12,30	13,77	14,73	15,97
25,30	15,97	17,27	18,00	19,03
32,30	22,10	23,33	24,33	25,47

Tabela 4 - Gradiente de Pressão através de Prato Perfurado
Irrigado (cmH₂O) (PF5)

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	2,70	3,70	4,50	5,60
13,54	3,43	4,50	5,40	6,50
19,60	4,70	5,90	6,63	7,63
25,30	5,93	7,20	8,30	9,57
32,30	7,83	9,27	10,73	12,17
39,60	11,07	13,43	15,23	16,20
48,60	14,50	16,50	18,00	-

Tabela 5 - Gradiente de Pressão através de Prato Perfurado
Irrigado (cmH₂O) (PF6)

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	3,10	3,83	4,77	5,80
14,54	3,67	4,87	5,63	6,50
19,60	5,10	6,23	7,10	7,90
25,30	6,90	7,83	8,77	9,87
32,30	10,23	11,13	11,80	12,77
39,60	14,57	15,27	15,97	17,27

Tabela 6 - Gradiente de Pressão através de Prato Perfurado
Irrigado (cmH₂O) (PF7)

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	2,73	3,30	4,40	5,30
13,54	3,00	3,77	4,80	5,60
19,60	3,57	4,50	5,40	6,33
25,30	4,83	5,57	6,27	7,27
32,30	6,37	7,10	7,90	8,87
39,60	9,13	9,63	10,67	11,27
48,60	-	-	-	-

Tabela 7 - Gradiente de Pressão através de Pratos Valvula dos secos (cmH₂O)

Prato Q(m ³ /h)	PVA	PVB	PVC	PVD
9,02	0,023	0,024	0,028	0,02,8
13,54	0,031	0,036	0,038	0,04,1
19,60	0,045	0,048	0,052	0,056
25,30	0,066	0,068	0,064	0,070
32,30	0,076	0,084	0,078	0,096
39,60	0,109	0,112	0,124	0,126
48,60	0,143	0,148	0,158	0,162

Tabela 8 - Gradiente de Pressão através de Pratos Valvula do Irrigado (cmH₂O): PVA

h(cm) Q(m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	5,00	4,80	5,37	6,47
13,54	5,47	6,53	7,03	8,40
19,60	6,57	7,53	8,47	9,47
25,30	7,47	9,00	10,43	11,40
32,30	10,60	12,93	14,00	15,20
39,60	15,37	16,63	17,70	19,23

**Tabela 9 - Gradiente de Pressão através de Pratos Valvula
dos Irrigado (cmH₂O): PVB**

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	5,33	5,87	6,67	7,00
13,54	6,27	7,33	8,27	8,80
19,60	6,93	7,73	9,13	10,00
25,30	7,60	8,47	10,50	11,47
32,30	9,10	10,47	13,47	15,07
39,60	11,93	14,73	17,17	18,97
48,60	15,07	17,40	-	-

**Tabela 10 - Gradiente de Pressão através de Pratos Valvula
dos Irrigado : PVC**

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	3,53	5,47	7,07	7,87
13,54	4,07	6,40	7,67	8,73
19,60	4,80	7,13	8,88	9,60
25,30	5,60	8,07	9,47	10,13
32,30	7,00	9,47	10,53	12,20
39,60	9,60	12,53	14,73	16,60
48,60	12,13	15,67	-	-

Tabela 11 - Gradiente de Pressão através de Pratos Mistos se
cos (cmH₂O)

Prato Q(m ³ /h)	PM1FA	PM3FA	PM5FA	PM6FA	PM7FA
9,02	1,30	0,80	0,40	0,40	0,20
13,54	2,00	1,70	0,60	0,70	0,40
19,60	2,70	2,30	1,30	1,40	0,80
25,30	3,70	3,00	1,60	2,00	1,40
32,30	5,00	4,30	2,50	2,60	2,00
39,60	6,30	5,60	3,60	3,60	2,70
48,60	8,10	7,50	4,70	4,60	3,60

Tabela 12 - Gradiente de Pressão através de Pratos Mistos ir
rigado (cmH₂O):PM1FA

h(cm) Q(m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	3,73	4,17	5,07	5,47
13,54	5,23	5,50	6,23	6,63
19,60	5,80	6,67	7,53	8,53
25,30	6,23	7,27	8,13	8,83
32,30	6,93	8,37	9,07	10,20
39,60	8,13	9,83	11,40	12,23
48,60	10,37	12,67	14,20	15,27

Tabela 13 - Gradiente de Pressão (cmH₂O) para PM3FA
Irrigado

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	3,27	4,30	4,60	5,53
13,54	5,30	5,63	5,77	6,57
19,60	5,97	6,77	7,27	8,10
25,30	6,33	7,53	7,97	8,90
32,30	7,43	8,33	9,03	10,07
39,60	8,27	9,93	10,80	11,70
48,60	10,07	12,33	13,30	14,30

Tabela 14 - Gradiente de Pressão (cmH₂O) para PM5FA
Irrigado

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	2,60	3,30	4,20	5,13
13,54	3,00	4,07	4,70	5,53
19,60	4,17	5,13	5,73	5,40
25,30	4,83	5,93	6,40	6,97
32,30	5,63	6,60	7,43	8,17
39,60	6,30	7,57	8,30	8,90
48,60	6,77	8,17	9,13	9,70

Tabela 15 - Gradiente de Pressão (cmH₂O) para PM6FA

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	2,80	3,57	4,50	5,13
13,54	3,23	4,30	4,93	5,57
19,60	4,50	5,40	5,90	6,33
25,30	5,57	6,40	6,87	6,93
32,30	6,00	7,27	7,77	8,60
39,60	6,67	7,90	8,83	9,30
48,60	7,23	8,43	10,30	10,53

Tabela 16 - Gradiente de Pressão (cmH₂O) PM7FA

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	2,27	3,27	4,20	5,03
13,54	2,79	3,60	4,33	5,30
19,60	3,17	4,47	5,03	5,66
25,30	4,30	5,23	5,73	6,50
32,30	5,60	6,53	6,67	7,47
39,60	6,03	6,97	7,73	8,70
48,60	6,83	7,83	8,67	9,37

Tabela 17 - Gradiente de Pressão através de Pratos Mistos Secos (cmH₂O)

Prato Q (m ³ /h)	PM1FB	PM3FB	PM5FB	PM6FB	PM7FB
9,02	1,20	1,00	0,50	0,30	0,20
13,54	2,20	1,80	0,70	0,70	0,50
19,60	3,20	3,00	1,50	1,40	0,90
25,30	4,40	4,00	2,10	2,20	1,50
32,30	5,80	5,20	3,20	3,20	2,40
39,60	6,60	6,80	4,20	4,20	3,30
48,60	9,80	8,60	5,30	5,30	4,20

Tabela 18 - Gradiente de Pressão através de Pratos Mistos Irrigado (cmH₂O): PM1FB

h (cm) Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	4,67	5,57	5,63	6,0
13,54	5,53	6,60	7,07	7,13
19,60	6,60	7,40	8,33	8,50
25,30	7,07	7,80	8,87	9,47
32,30	7,53	8,67	9,59	10,33
39,60	8,60	9,43	11,07	12,33
48,60	10,20	11,07	14,20	15,40

Tabela 19 - Gradiente de Pressão através de Pratos Mistos
Irrigado (cmH₂O) - PM3FB

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	4,07	5,27	5,93	6,50
13,54	5,67	6,33	7,40	7,73
19,60	6,47	7,53	8,53	9,07
25,30	7,07	8,13	8,90	9,53
32,30	7,53	8,53	9,73	10,40
39,60	8,43	9,60	10,80	11,60
48,60	9,67	11,13	12,27	13,60

Tabela 20 - Gradiente de Pressão através de Pratos Mistos
Irrigado (cmH₂O) PM5FB

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	2,80	3,60	4,50	5,40
13,54	3,17	4,27	5,10	6,07
19,60	4,23	5,23	6,00	7,00
25,30	5,07	6,27	6,93	7,73
32,30	6,00	7,40	8,13	9,00
39,60	6,87	8,00	8,80	9,60
48,60	7,40	8,40	9,47	10,27

Tabela 21 - Gradiente de Pressão através de Pratos Mistos

Irrigado (cmH₂O) PM6FB

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	3,10	3,80	4,73	5,60
13,54	3,70	4,67	5,53	6,07
19,60	4,80	5,87	6,60	7,33
25,30	5,73	6,60	7,57	8,27
32,30	6,67	7,60	8,43	9,27
39,60	7,20	8,10	8,93	9,80
48,60	7,93	8,77	9,80	10,47

Tabela 22 - Gradiente de Pressão através de Pratos Mistos

Irrigado (cmH₂O): PM7FB

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	1,40	3,40	4,27	0,053
13,54	2,80	3,67	4,60	0,057
19,60	3,17	4,27	5,30	0,063
25,30	4,10	5,20	5,87	0,069
32,30	5,20	6,20	7,00	0,079
39,60	6,27	7,13	8,20	0,091
48,60	6,97	7,80	8,80	0,098

Tabela 23 - Gradiente de Pressão através de Pratos Misto
Secos (cmH₂O)

Prato Q (m ³ /h)	Prato				
	PM1FC	PM3FC	PM5FC	PM6FC	PM7FC
9,02	1,20	0,80	0,40	0,30	0,20
13,54	2,20	1,40	0,60	0,60	0,40
19,60	3,40	2,80	1,20	1,20	0,80
25,30	4,40	3,40	1,80	1,80	1,20
32,30	5,60	4,40	2,60	2,60	1,80
39,60	7,80	6,40	4,00	3,90	2,90
48,60	9,80	8,20	5,00	5,00	3,80

Tabela 24 - Gradiente de Pressão através de Pratos Misto
Irrigado (cmH₂O) : PM1FC

h (cm) Q (m ³ /h)	h (cm)			
	1	2	3	4
9,02	4,33	5,47	6,27	7,20
13,54	5,33	6,40	7,23	8,20
19,60	5,93	7,07	8,40	9,07
25,30	6,40	7,53	8,93	9,87
32,30	7,20	8,20	9,27	10,27
39,60	7,80	9,60	10,53	11,53
48,60	9,60	10,60	11,73	12,73

Tabela 25 - Gradiente de Pressão através de Pratos Misto

Irrigado (cmH₂O) : PM3FC

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	4,00	5,33	6,20	6,60
13,54	5,27	6,33	7,33	8,00
19,60	6,13	7,47	8,47	9,07
25,30	6,67	8,13	9,07	9,67
32,30	7,47	8,67	9,53	10,33
39,60	8,33	9,47	10,27	10,87
48,60	9,20	11,93	12,13	12,60

Tabela 26 - Gradiente de Pressão através de Prato Misto

Irrigado (cmH₂O) : PM5FC

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	2,60	3,60	4,53	5,60
13,54	3,00	4,20	5,13	6,13
19,60	4,20	5,40	6,33	7,40
25,30	4,93	6,20	7,07	8,07
32,30	6,07	7,20	8,33	9,33
39,60	7,13	8,20	9,07	10,00
48,60	7,53	8,67	9,67	10,47

Tabela 27 - Gradiente de Pressão através de Prato Misto

Irrigado (cmH₂O) : PM6FC

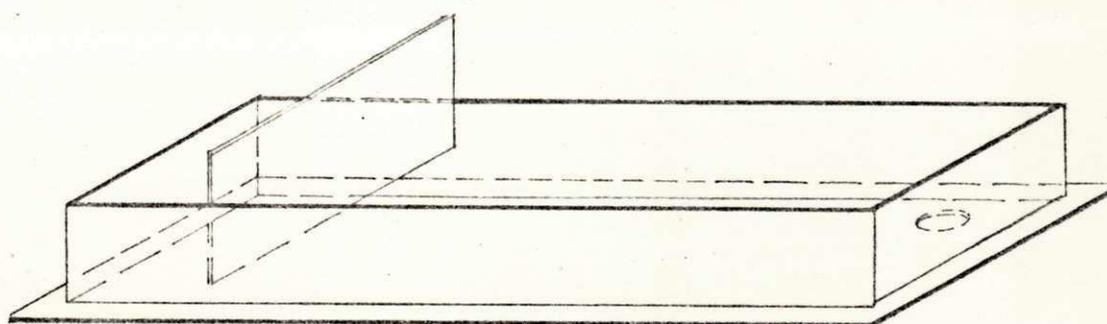
h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	3,00	3,80	4,80	5,60
13,54	3,47	4,67	5,53	6,20
19,60	4,67	5,80	6,60	7,40
25,30	5,40	6,80	7,47	8,20
32,30	6,47	7,67	8,53	9,27
39,60	7,33	8,40	9,27	9,87
48,60	7,80	8,87	9,67	10,47

Tabela 28 - Gradiente de Pressão através de Prato Misto

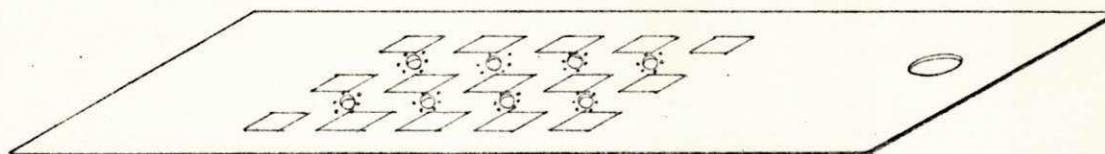
Irrigado (cmH₂O) : PM7FC

h (cm) \ Q (m ³ /h)	1	2	3	4
9,02	2,60	3,40	4,27	5,20
13,54	2,80	3,60	4,60	5,60
19,60	3,33	4,33	5,27	6,20
25,30	4,00	5,00	5,93	6,80
32,30	5,20	6,20	6,93	8,07
39,60	6,13	7,0	8,27	9,27
48,60	7,13	7,87	8,87	9,80

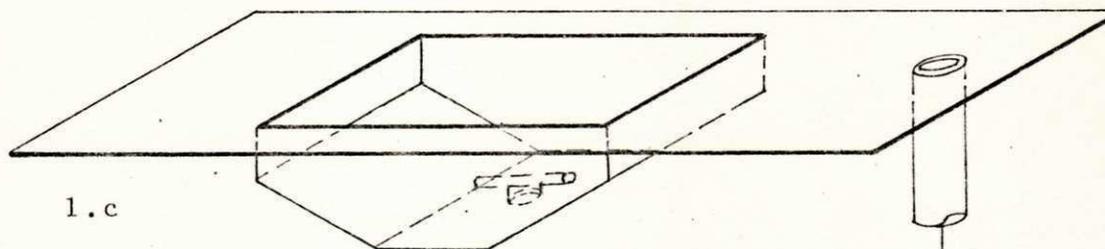
APÉNDICE B: FIGURAS



1.a



1.b



1.c

Figura 1 - Esquema detalhado do Equipamento

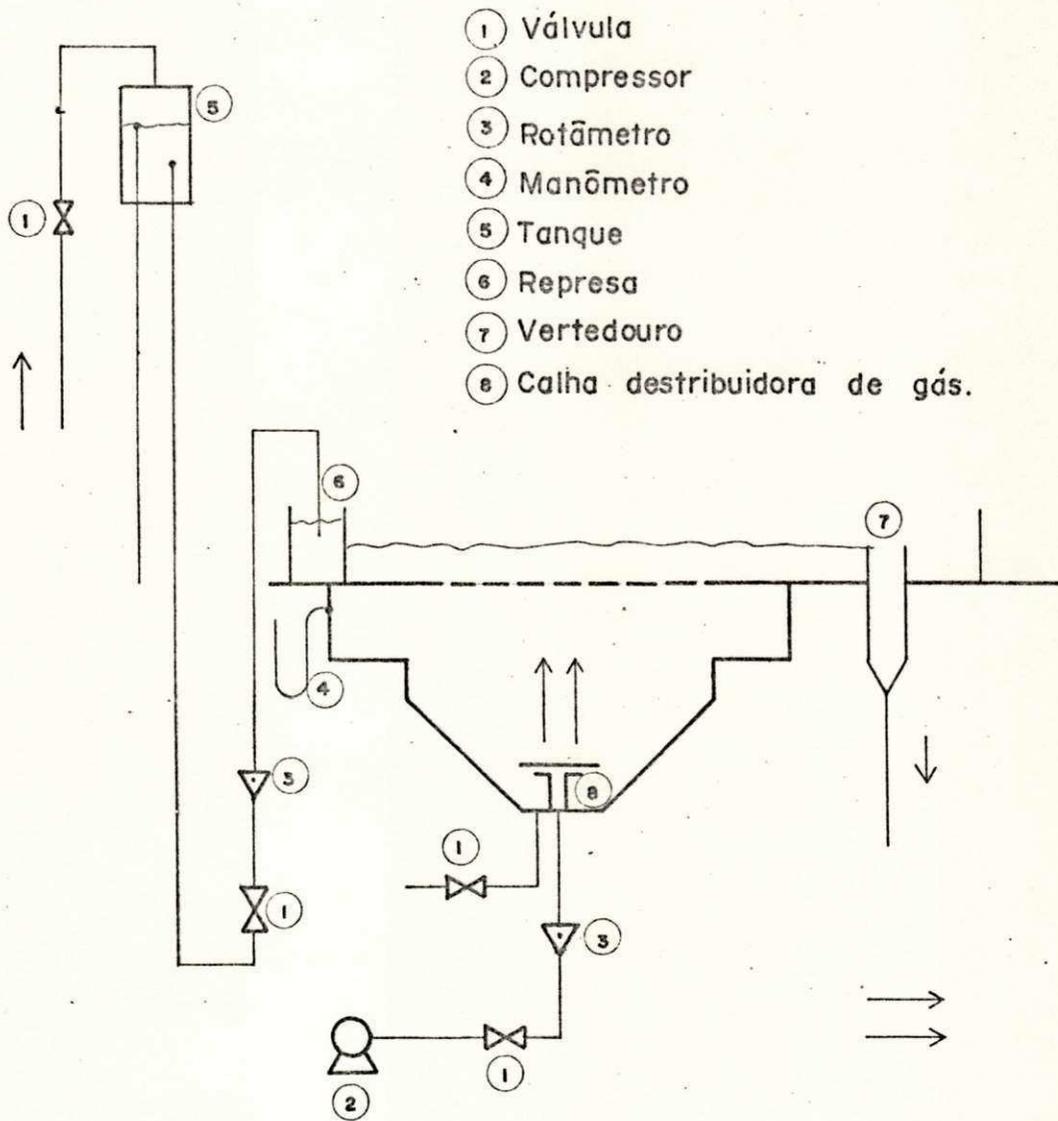


Figura 2 - Esquema do EQUIPAMENTO

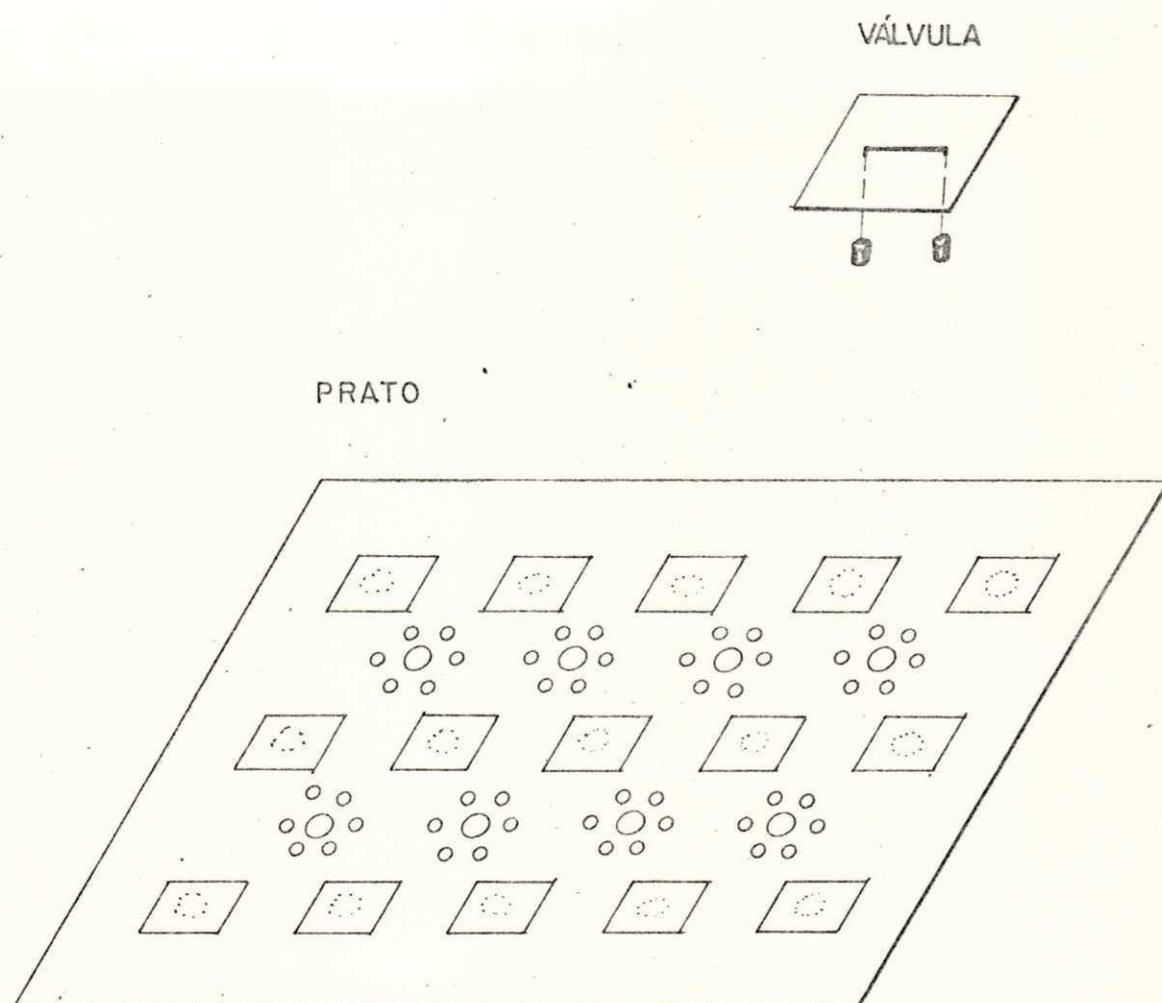
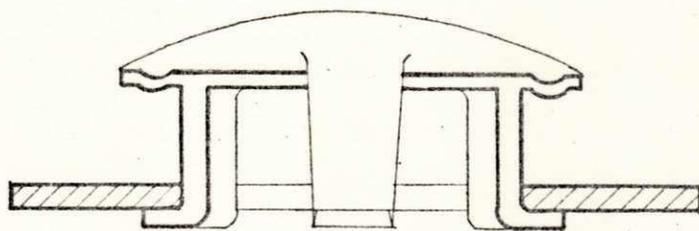
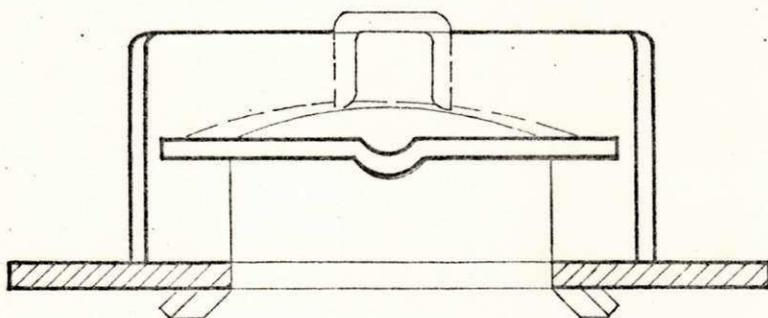


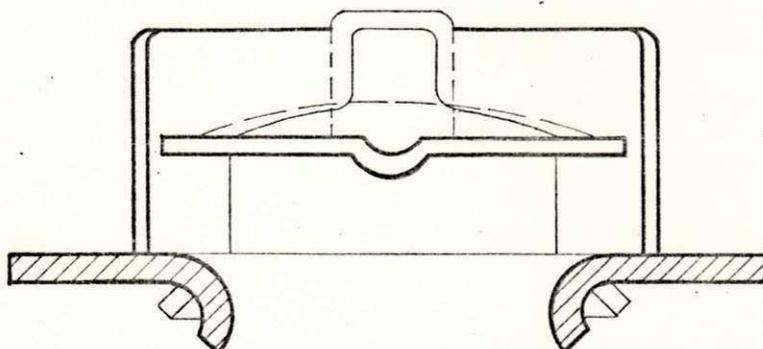
Figura 3 - Configuração generalizada do Prato



4a Válvula KOCH

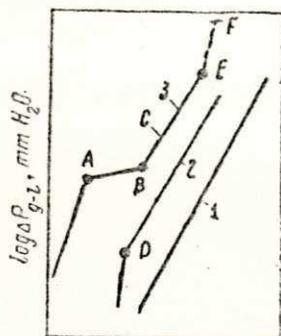


4b Válvula Glitsch-t



4c Válvula Glitsch-t Venturi

Figura 4 - Alguns tipos de válvulas



- 1 - Prato Seco
- 2 - Prato Irrigado com baixa vazão do gás
- 3 - Prato Irrigado a baixa vazão de líquido

Log G, Kg/m²h

Fig. 5 - Gradiente de Pressão através de prato Perfurado versus vazão mássica do gás. (16)

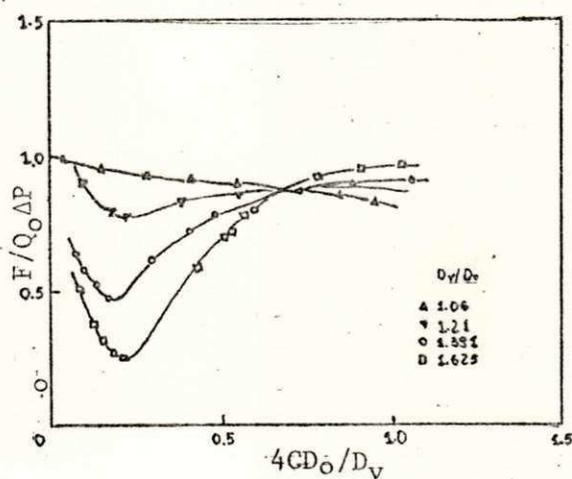
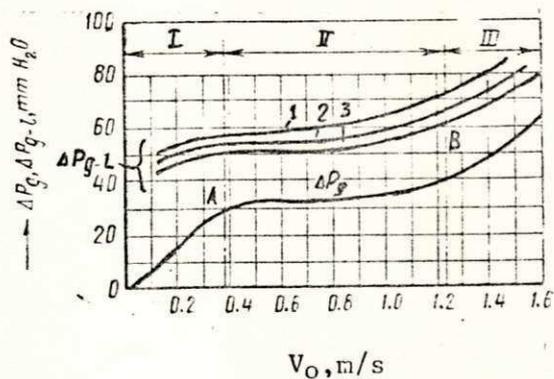


Fig. 6 - Correlação de força que atuam em um válvula (13)



- I- Válvula fechada
- II- Válvula parcialmente abertas
- III- Válvula totalmente abertas.
- 1 - L = 1,5 m³/h
- 2 - L = 3 m³/h
- 3 - L = 6 m³/h

Fig. 7 - Gradiente de Pressão através de pratos Perfurado versus vazões gás e líquido (16)

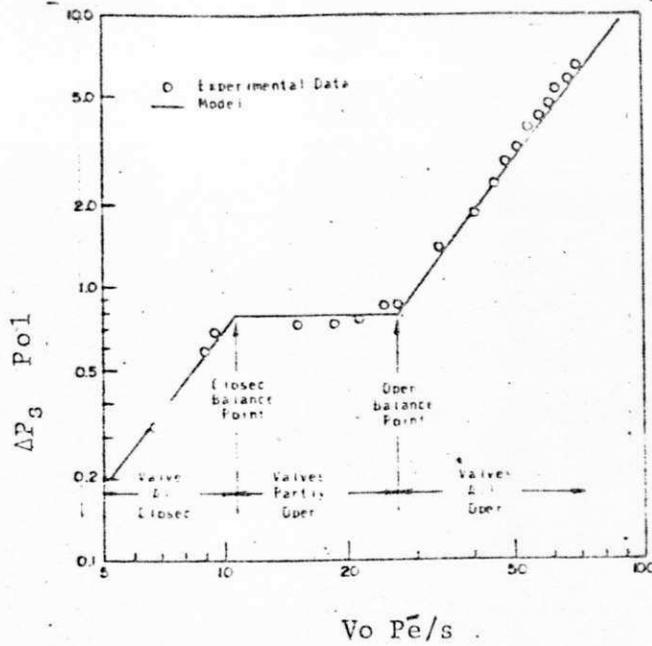


Fig. 8 - Modelo de Bolhas para queda de pressão em um prato valvulado seco (14)

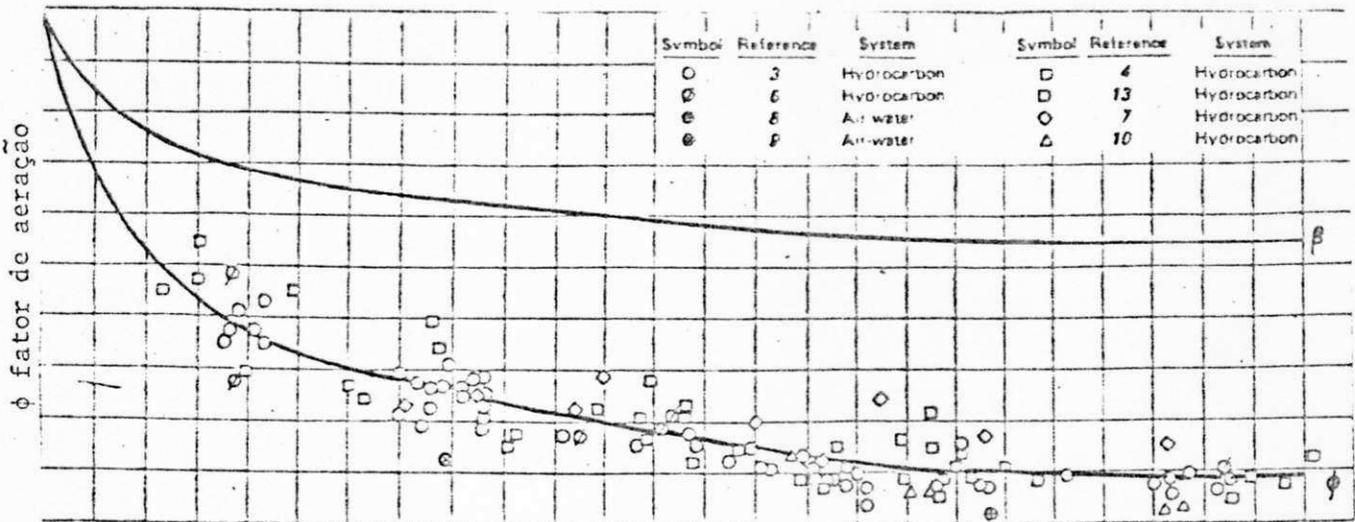
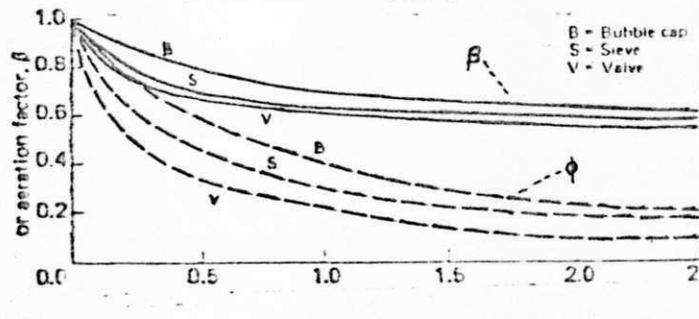


Fig. 9 - Correlação para queda de Pressão através da camada de líquido aerado (17)



$$F_{va} = V_c \sqrt{\rho \frac{p \bar{s}}{S}} \left(\frac{1b}{P \bar{s}^3} \right)^{1/2}$$

Fig.10 - Comparação entre os fatores de aerção para diversos pratos (17)

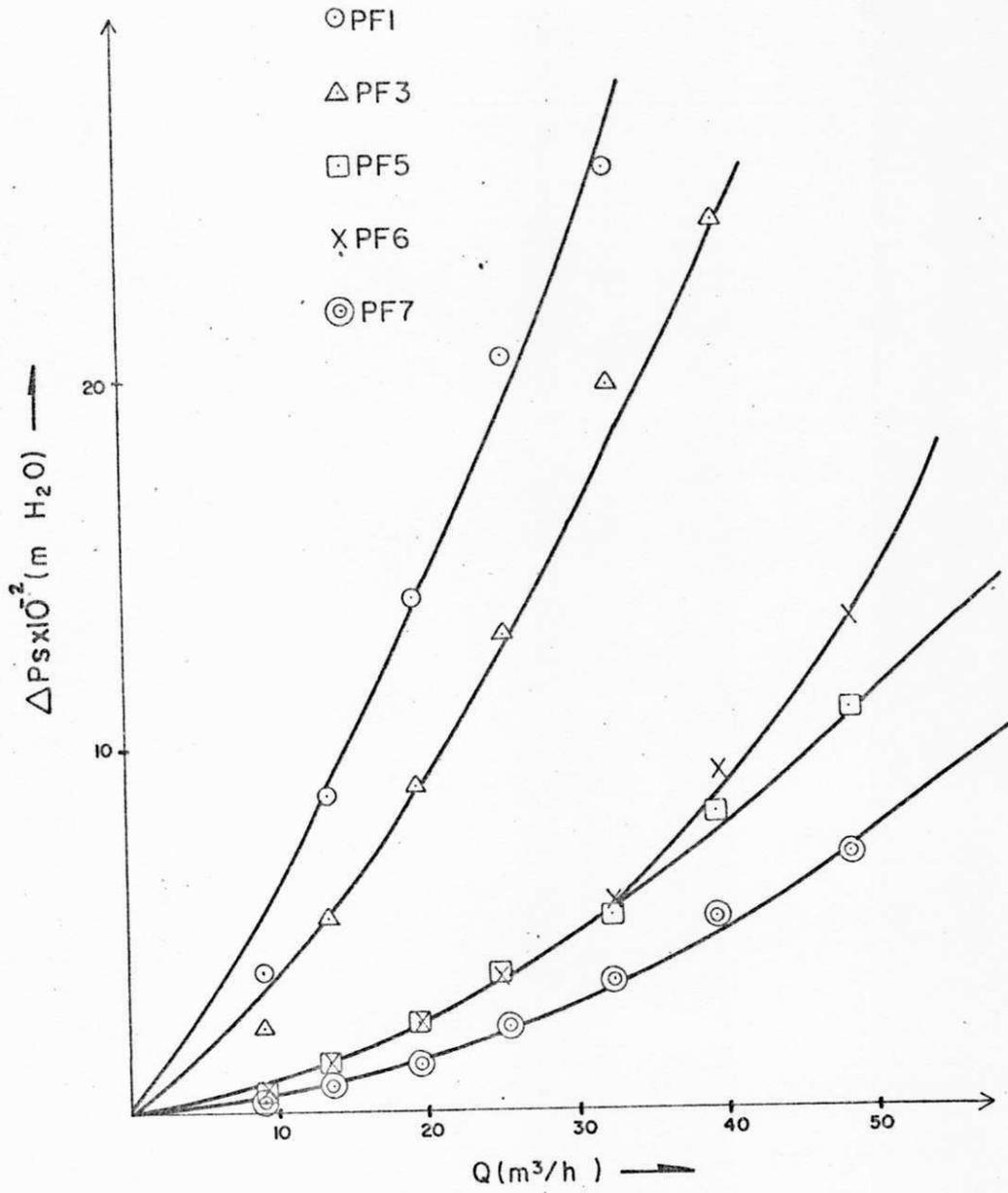


Figura 11 - Gradiente de pressão em prato perfurado seco versus vazão do gás

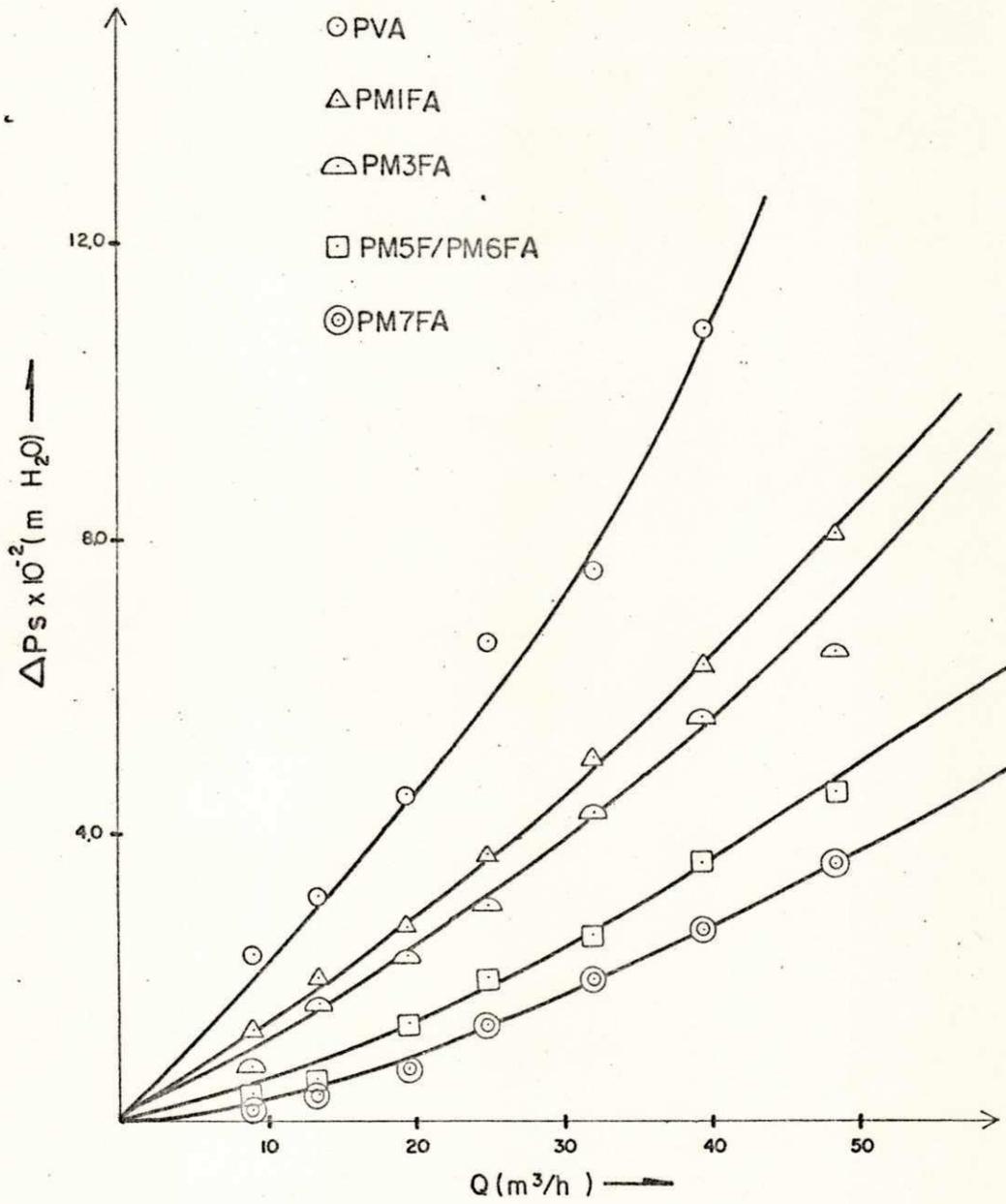


Figura 12 - Gradiente de pressão em prato valvulado e mistos do tipo A versus vazão do gás

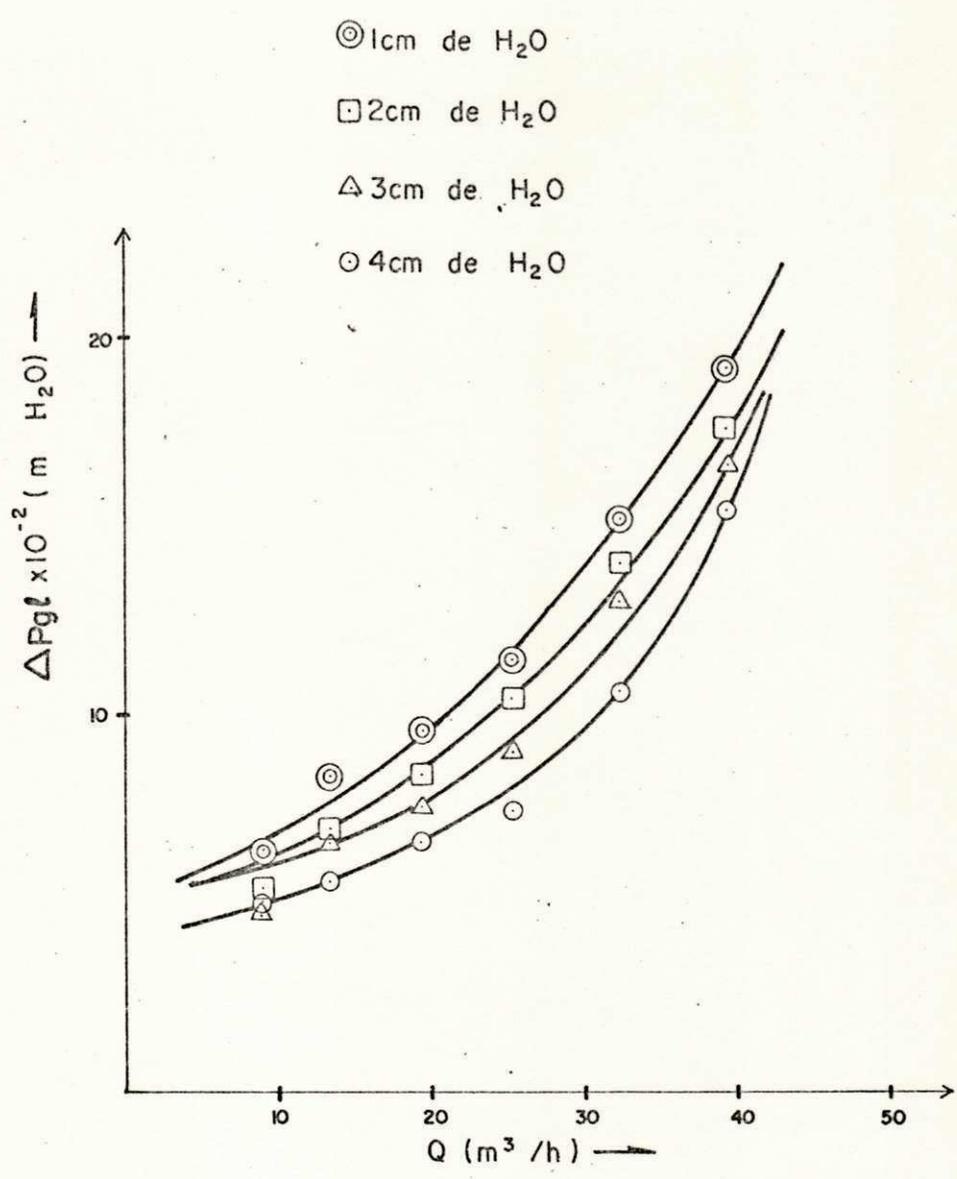


Figura 14 - Influência da altura da camada líquida sobre o gradiente de pressão para o prato PVA

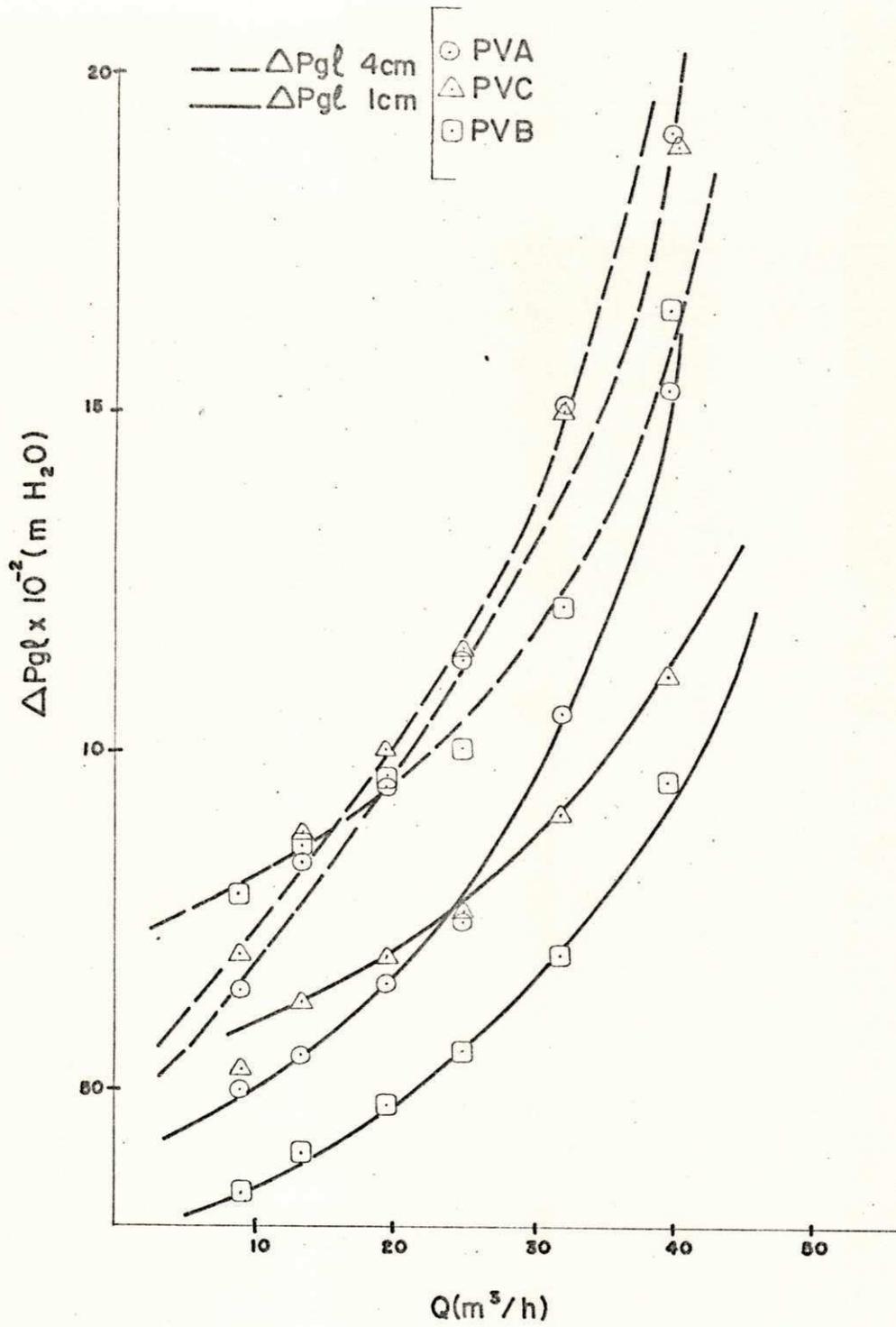


Figura 15 - Comparação entre os pratos valvulados, com altura da camada de líquido e o peso das válvulas como variáveis.

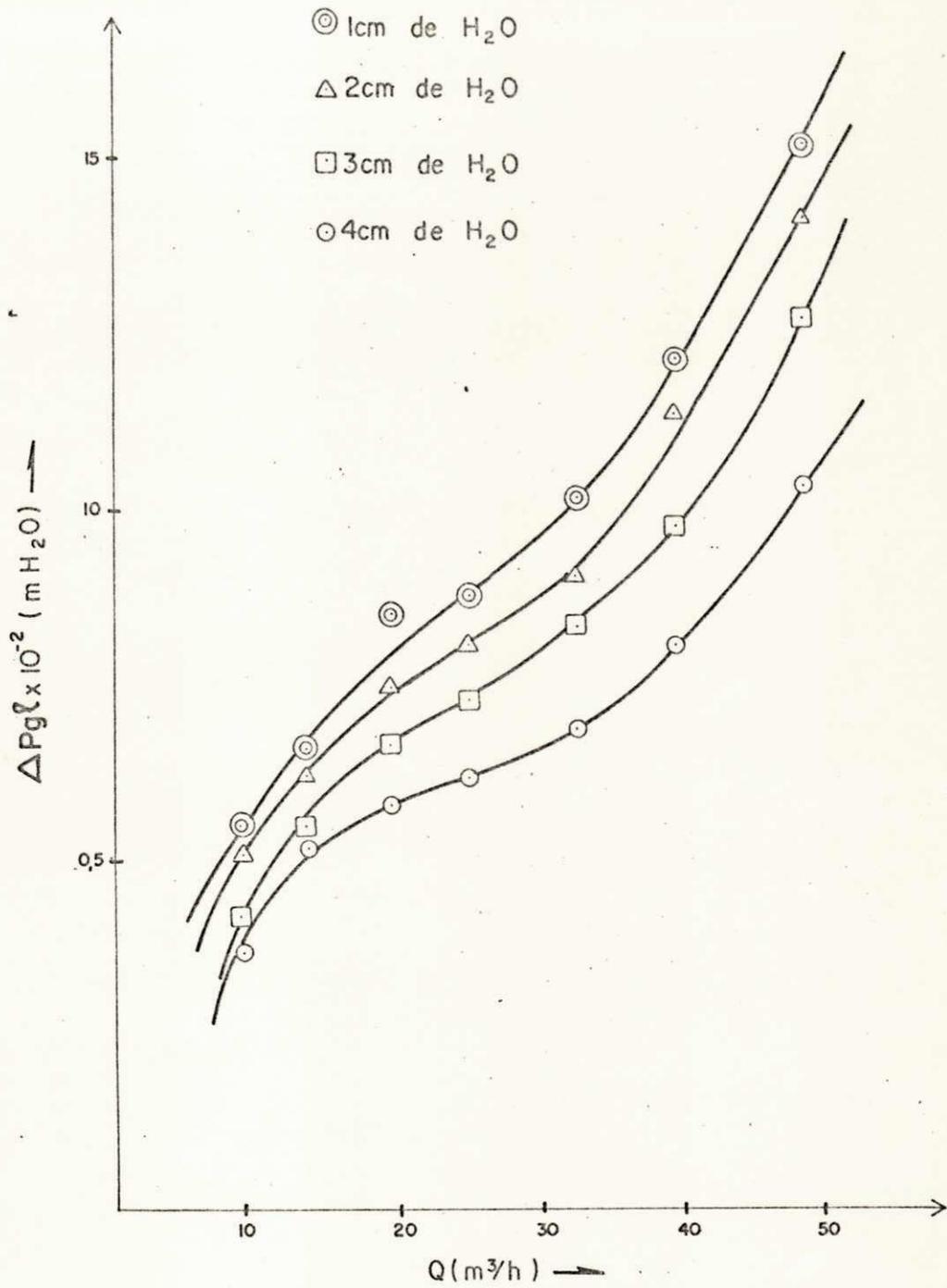


Figura 16 Influência da altura da camada líquida sobre o gradiente de pressão para o prato PMlFA

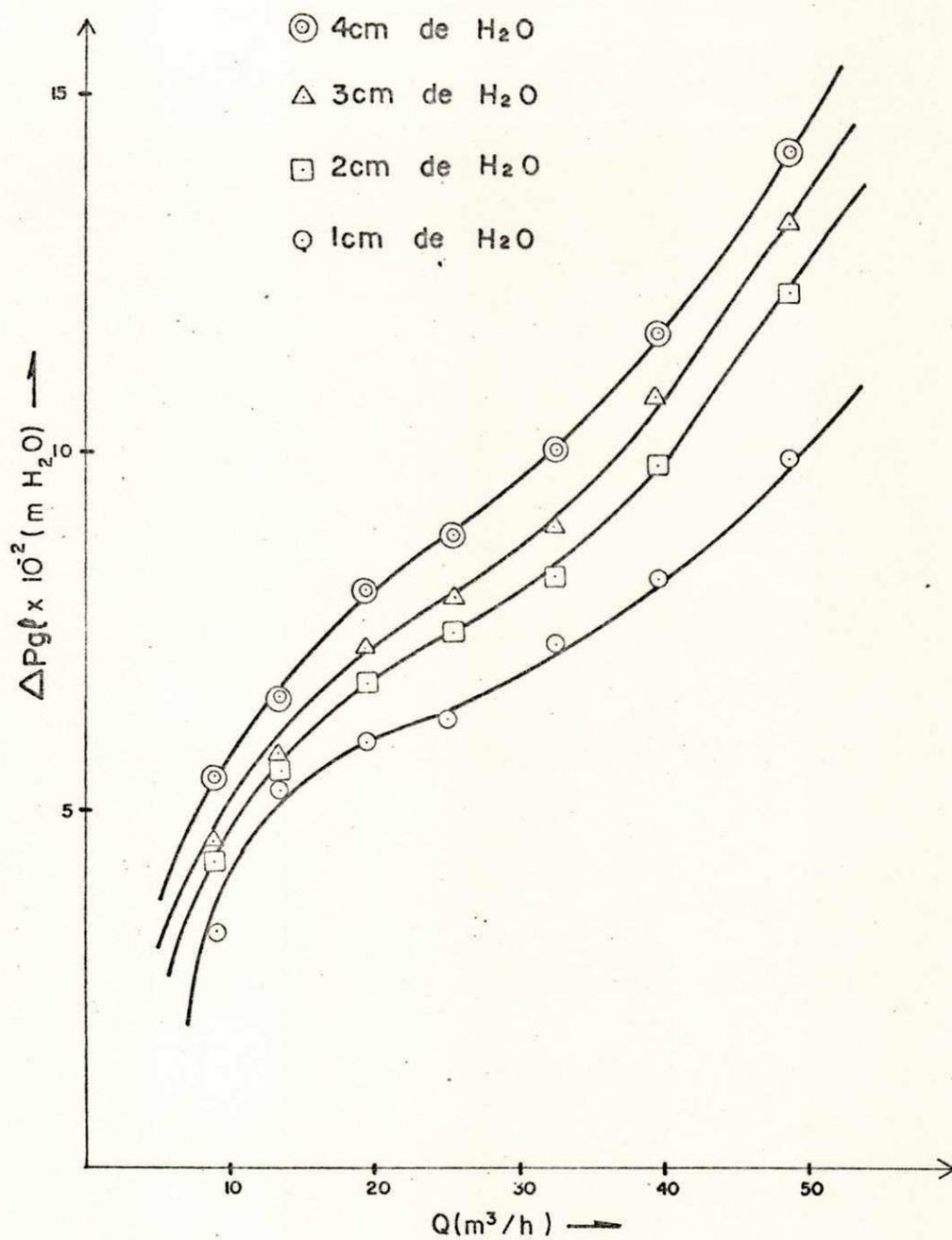


Figura 17- Influência da altura da camada líquida sobre o gradiente de pressão para o prato PM3FA

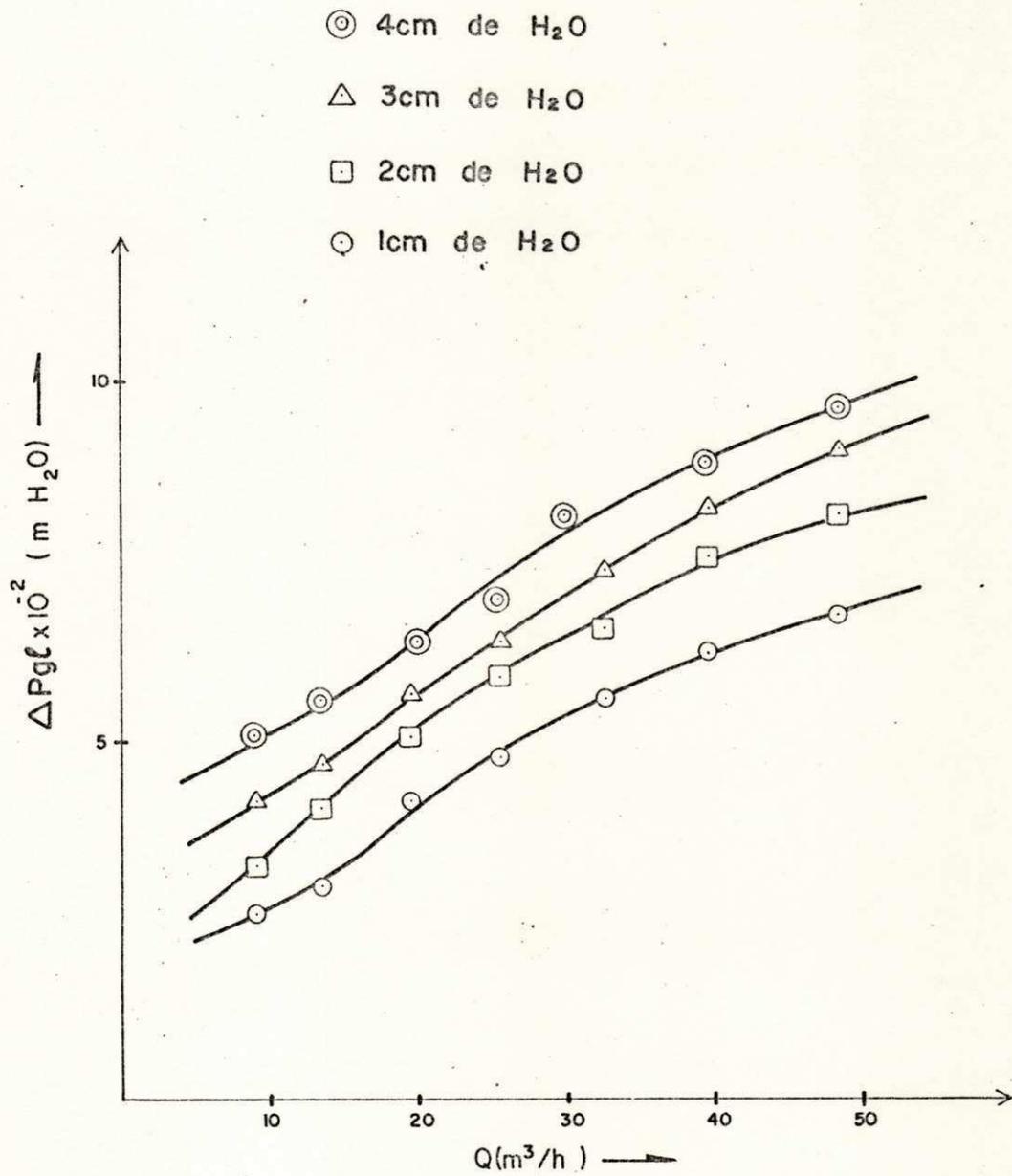


Figura 18 - Influência da altura da camada líquida sobre o gradiente de pressão para o prato PM5FA

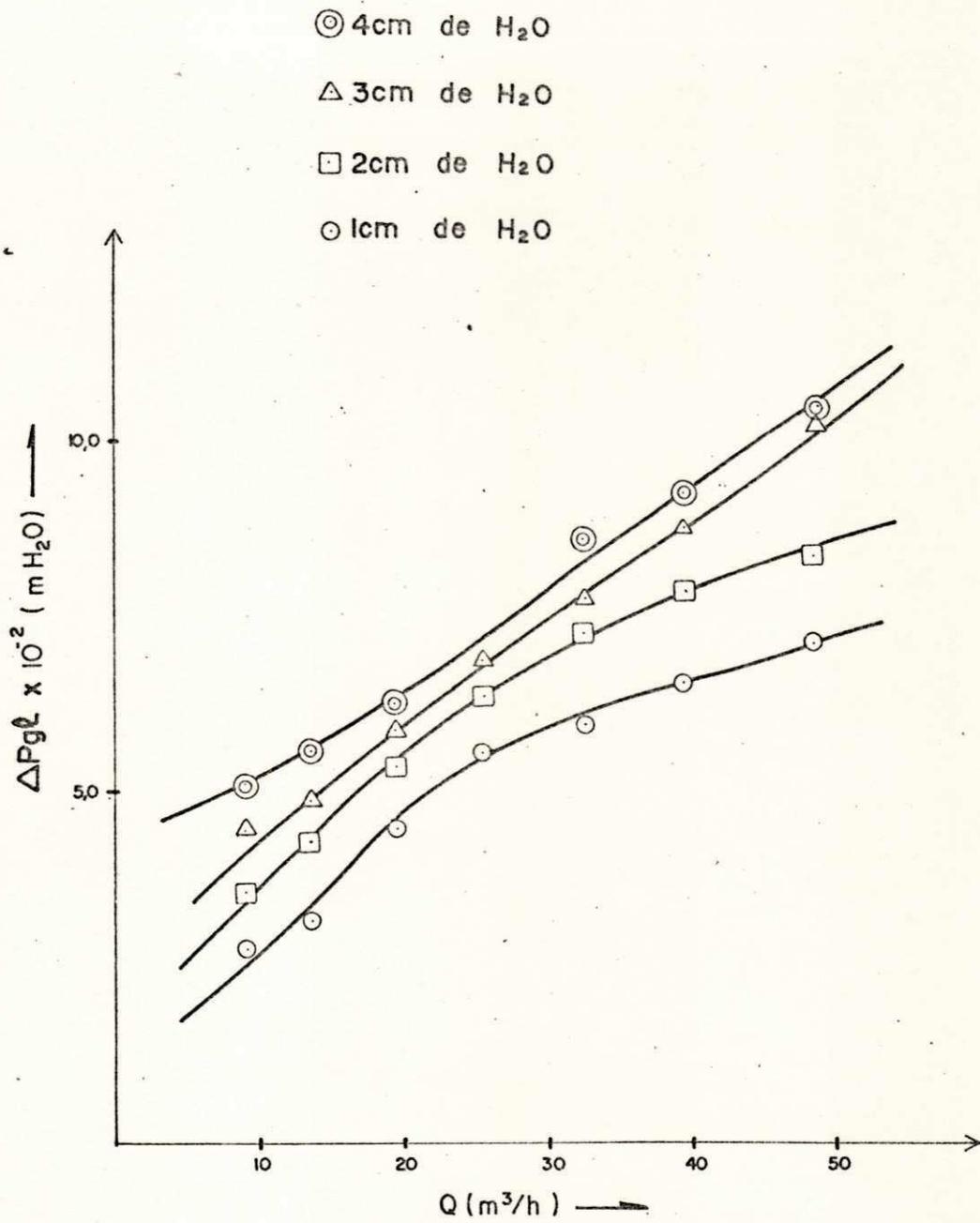


Figura 19 - Influência da altura da camada líquida sobre o gradiente de pressão para o prato PM6FA

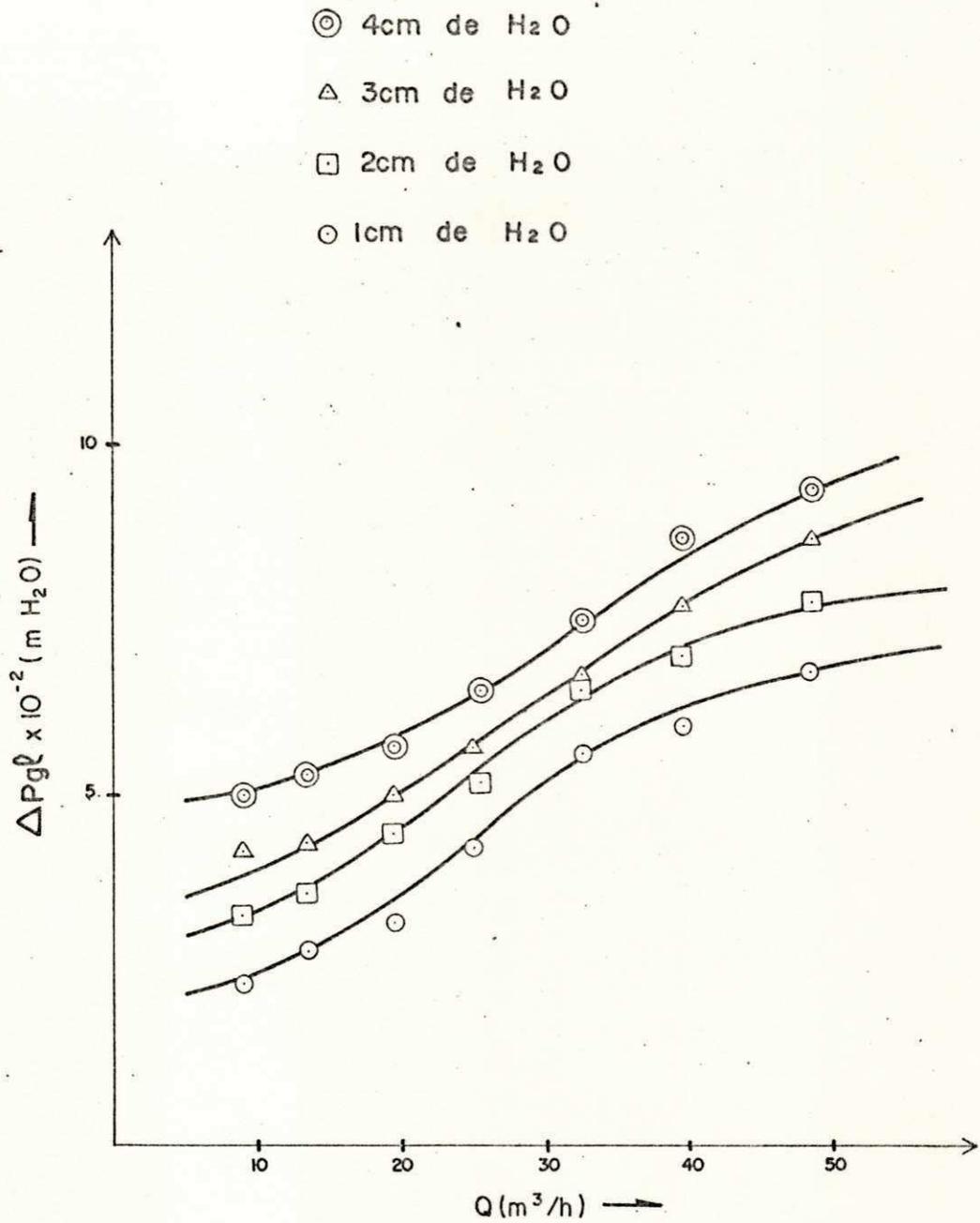


Figura 20 - Influência da altura da camada líquida sobre o gradiente de pressão para PM7FA

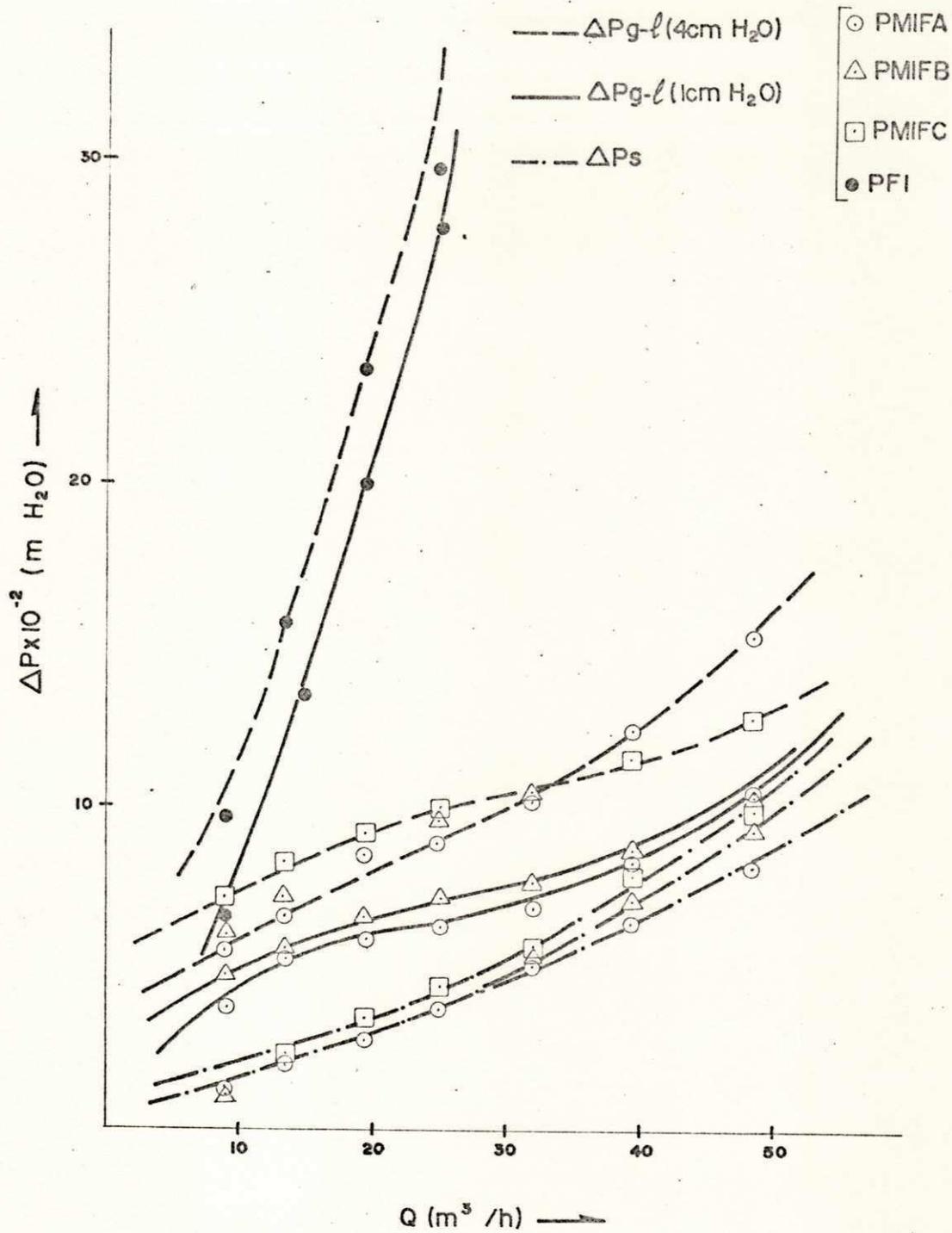


Figura 21 - Comparação entre pratos perfurado e misto, para configuração com 01 furo, com altura de camada líquida e peso das válvulas como variáveis.

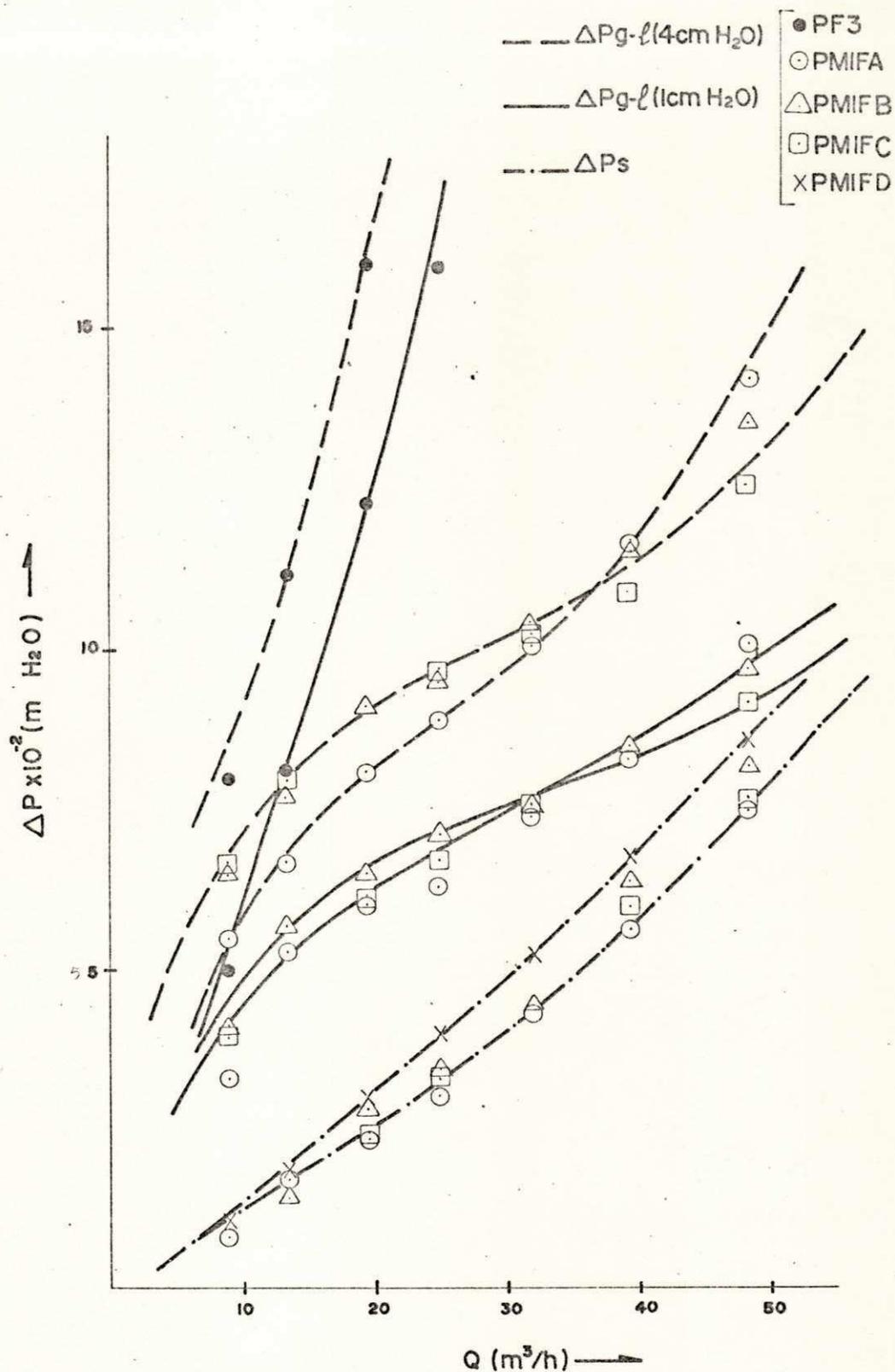


Figura 22 - Comparação entre pratos perfurado e misto, para configuração com 03 furos com altura da camada líquida e peso das válvulas como variáveis.

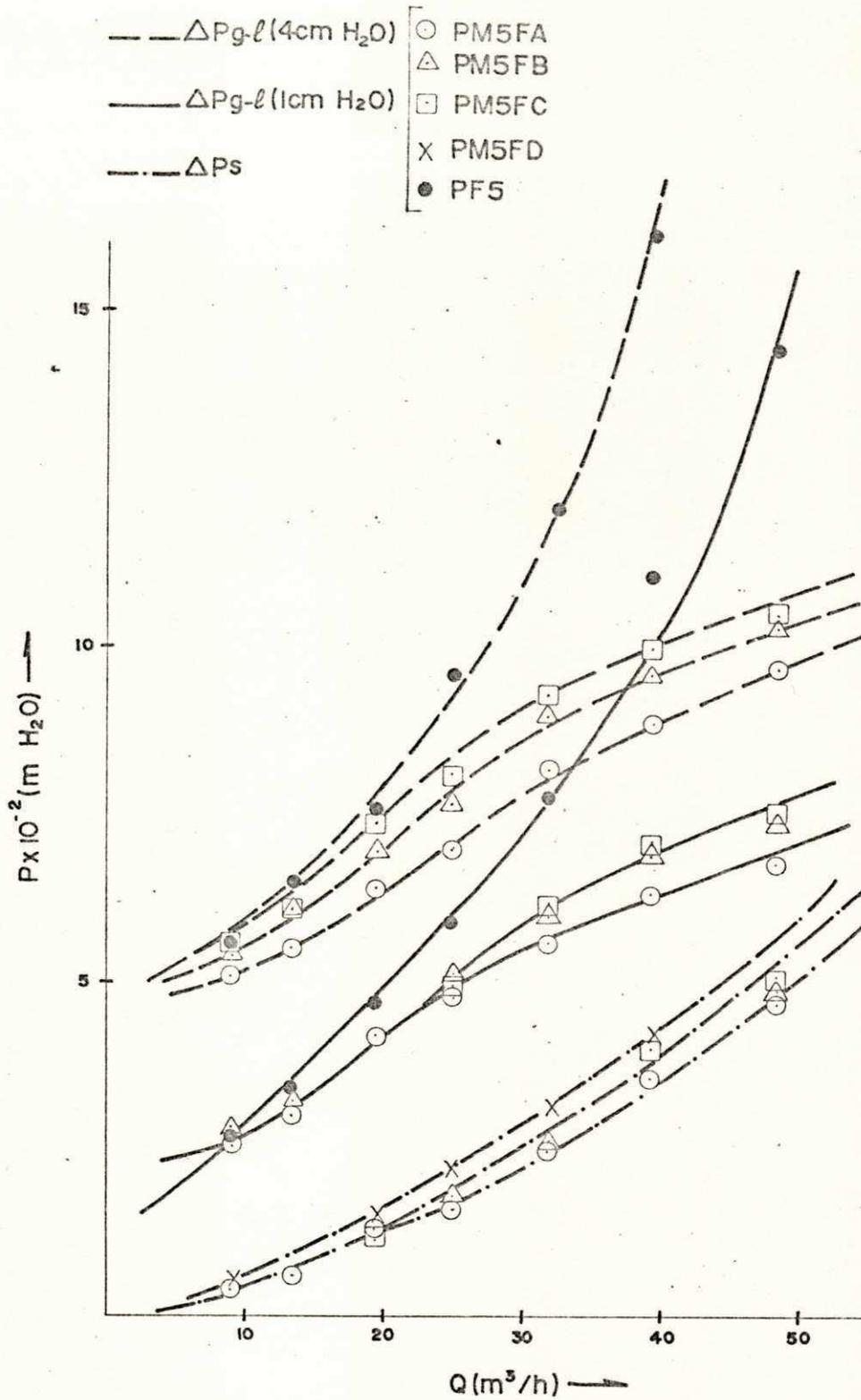


Figura 23 - Comparação entre pratos perfurado e Mist, para configuração com 05 furos, com altura da camada líquida e peso das válvulas como variáveis.

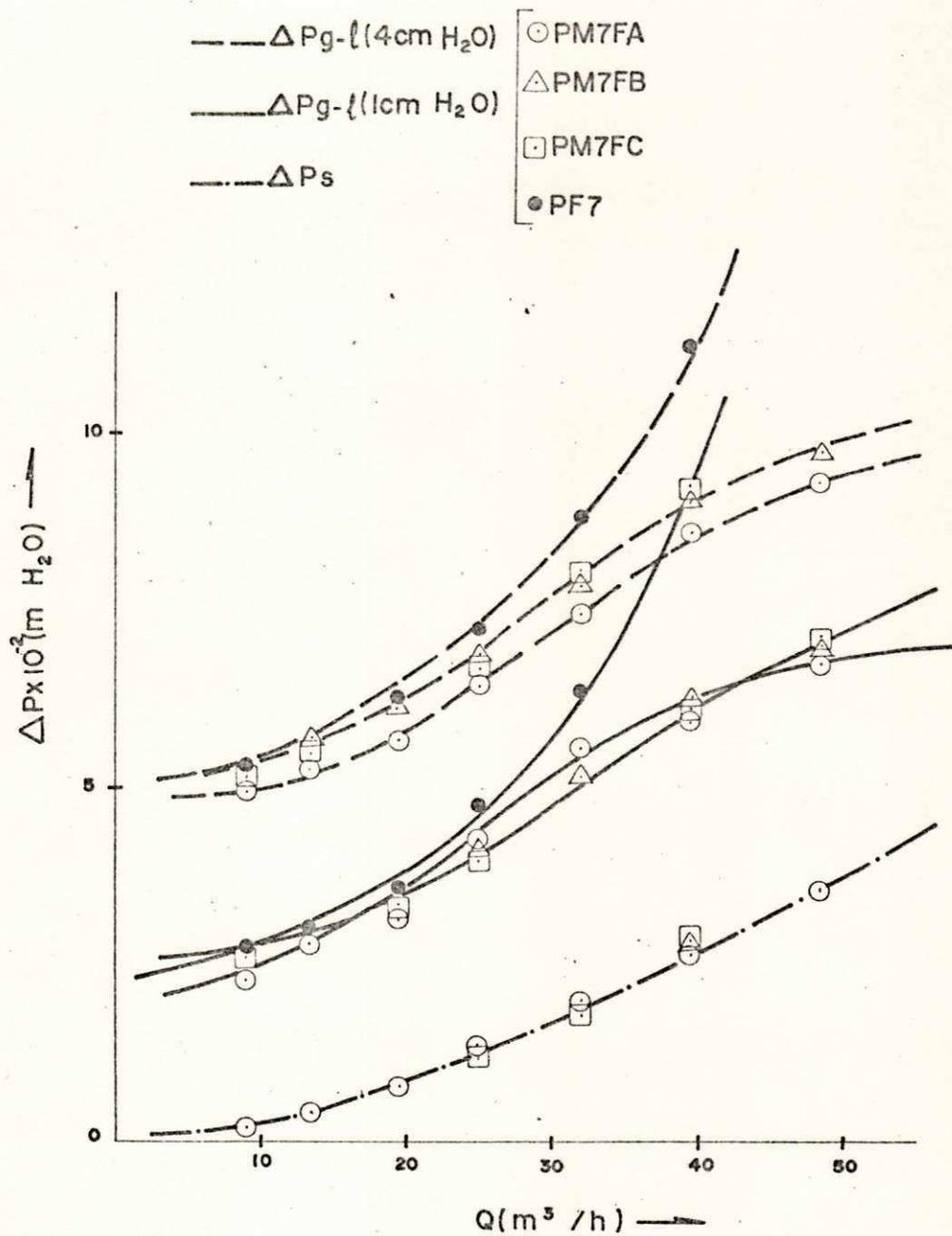


Figura 25 - Comparação entre pratos perfurados e Misto, para configuração com 07 furos, com altura da camada líquida e peso das válvulas como variáveis.

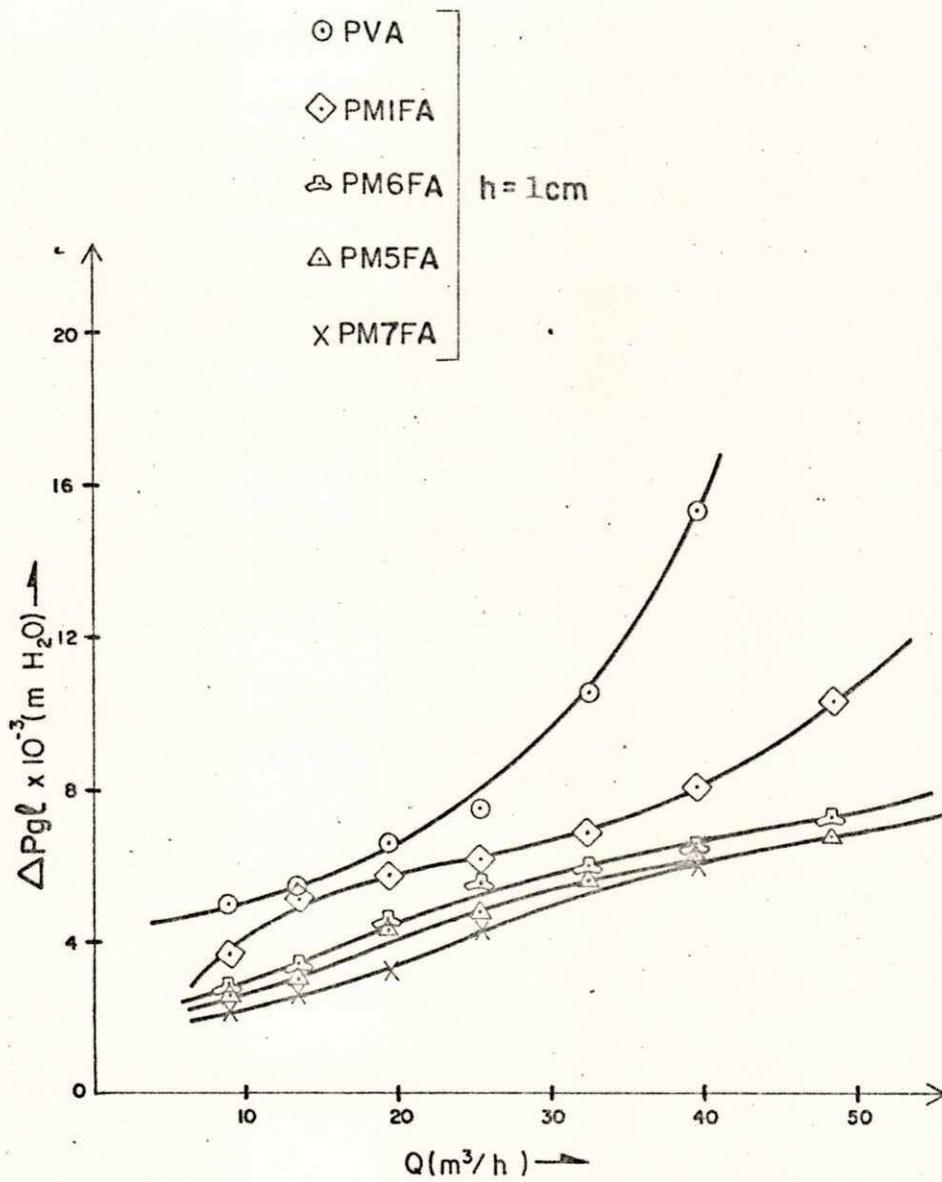


Figura 26 - Comparação entre pratos valvulado e mistos do tipo A

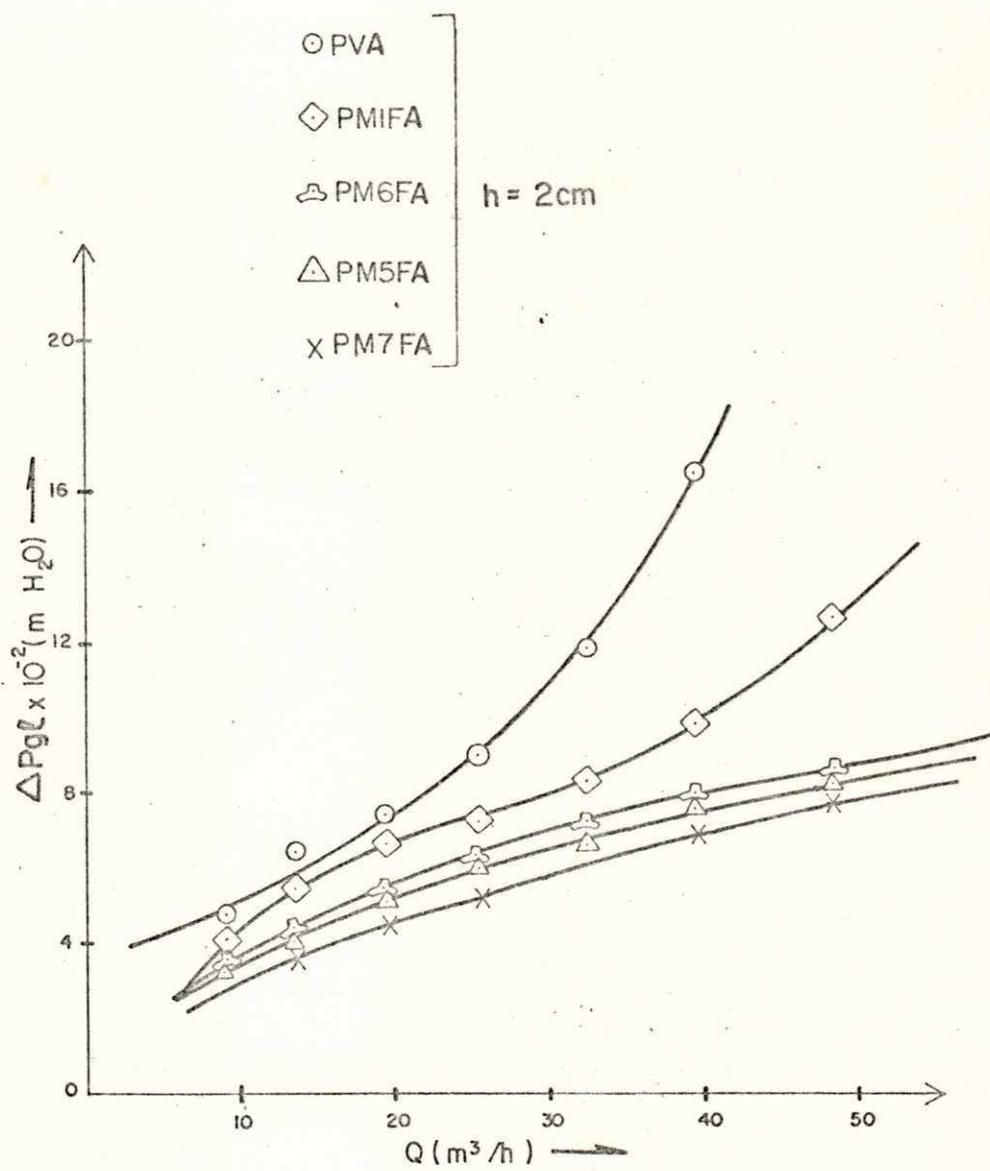


Figura 27- Comparação entre pratos valvulado e mistos do tipo A

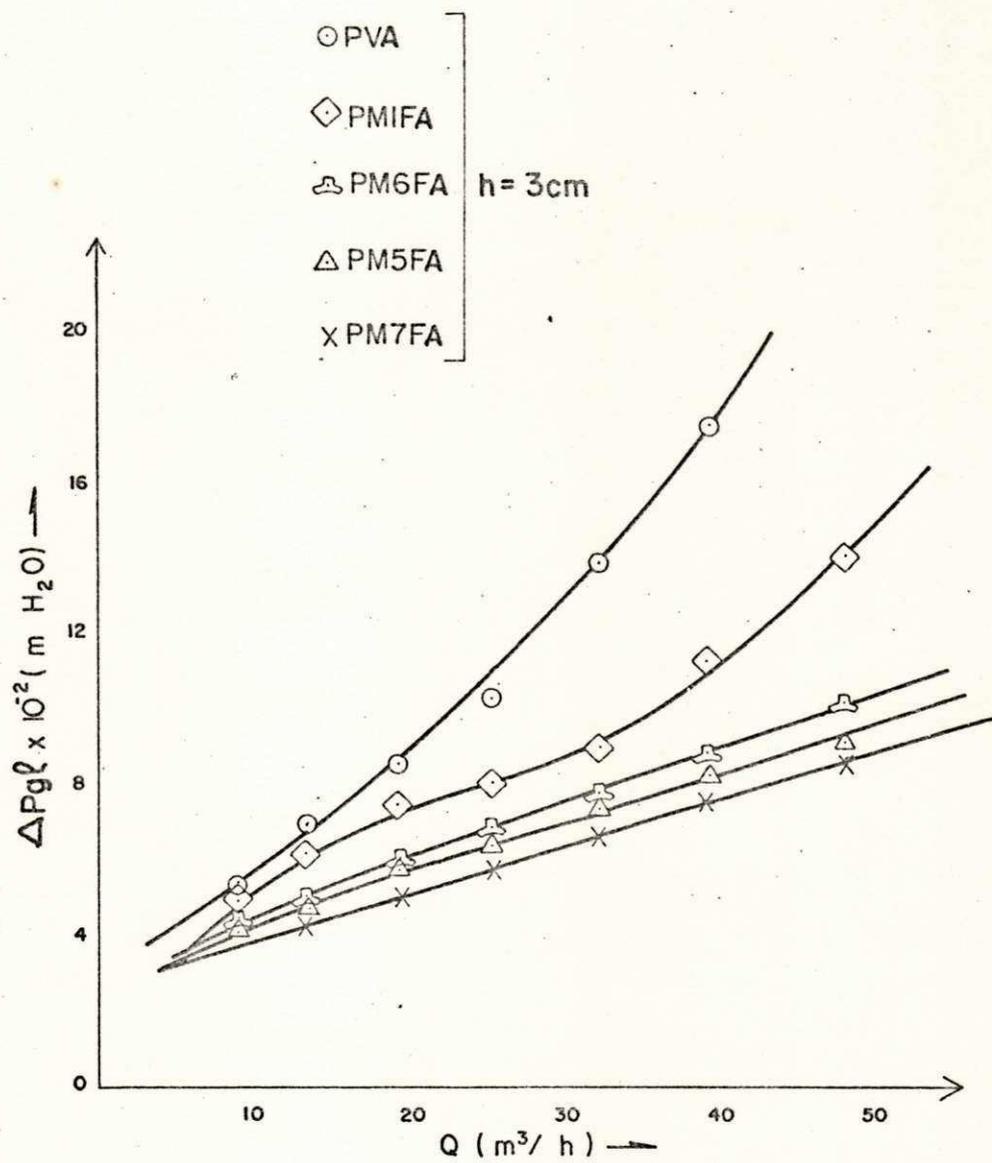


Figura 28 - Comparação entre pratos valvula do e misto do tipo A

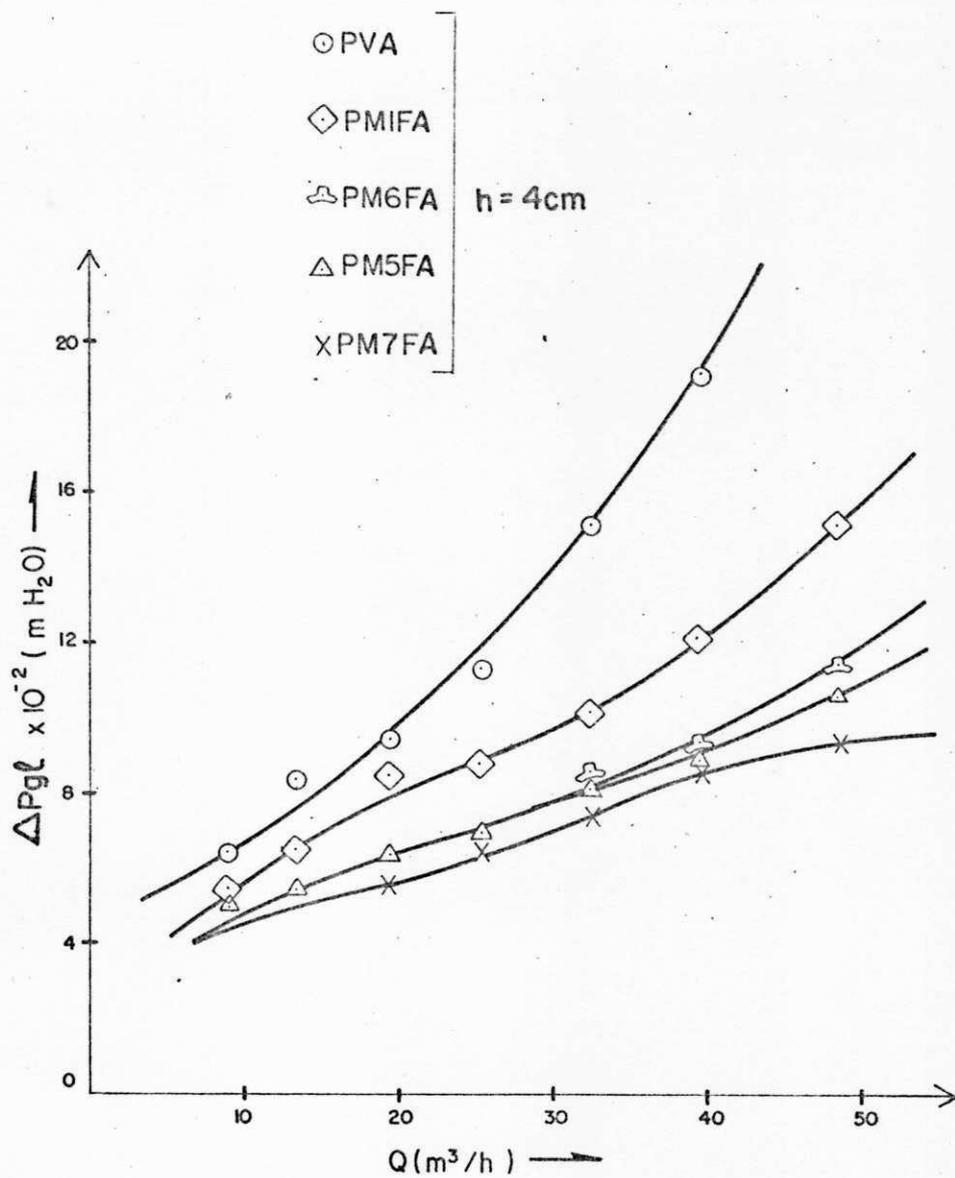


Figura 29. Comparação entre pratos valvulado e mistos do tipo A

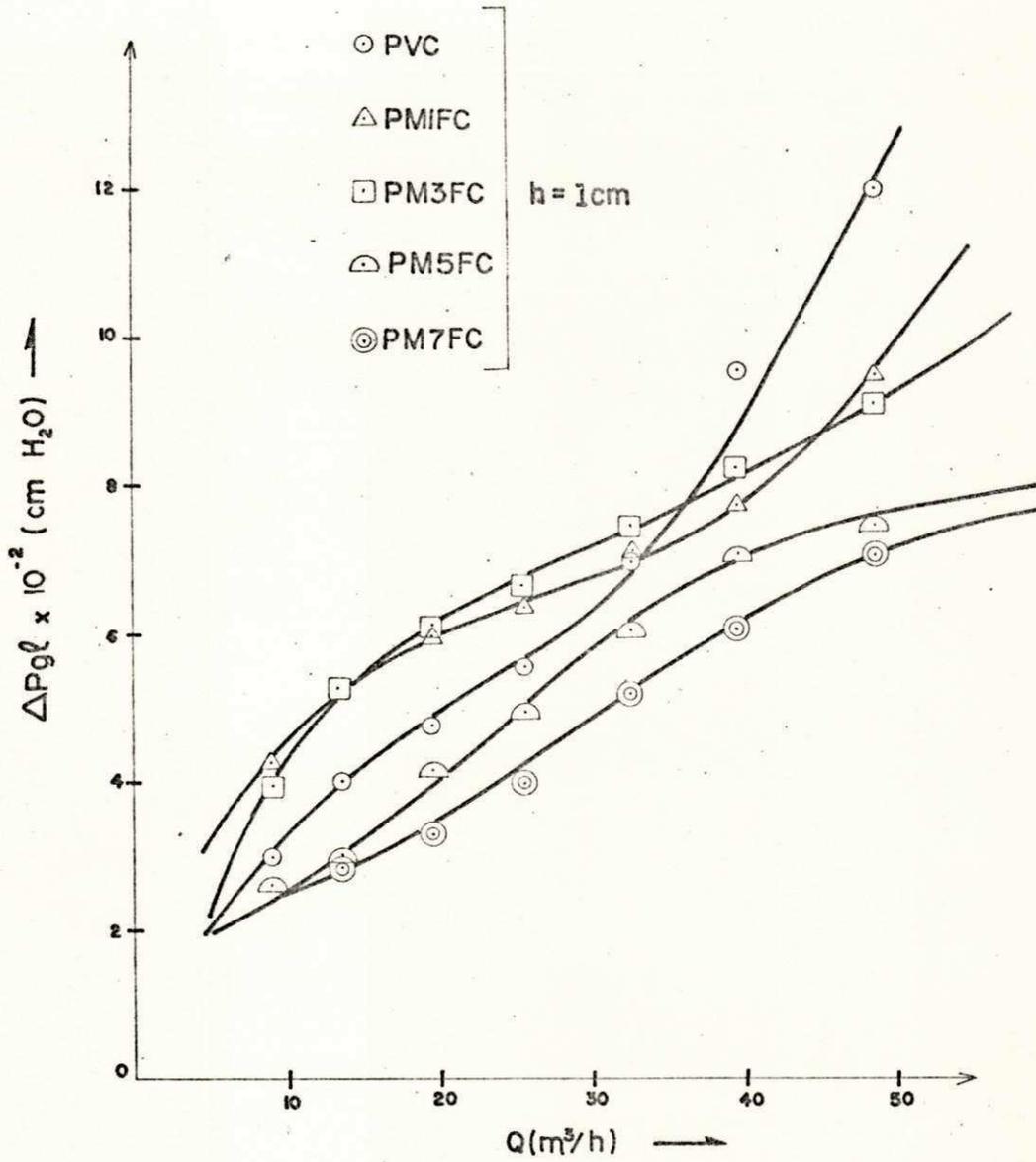


Figura 29- Comparação entre pratos valvulado e mistos do tipo C

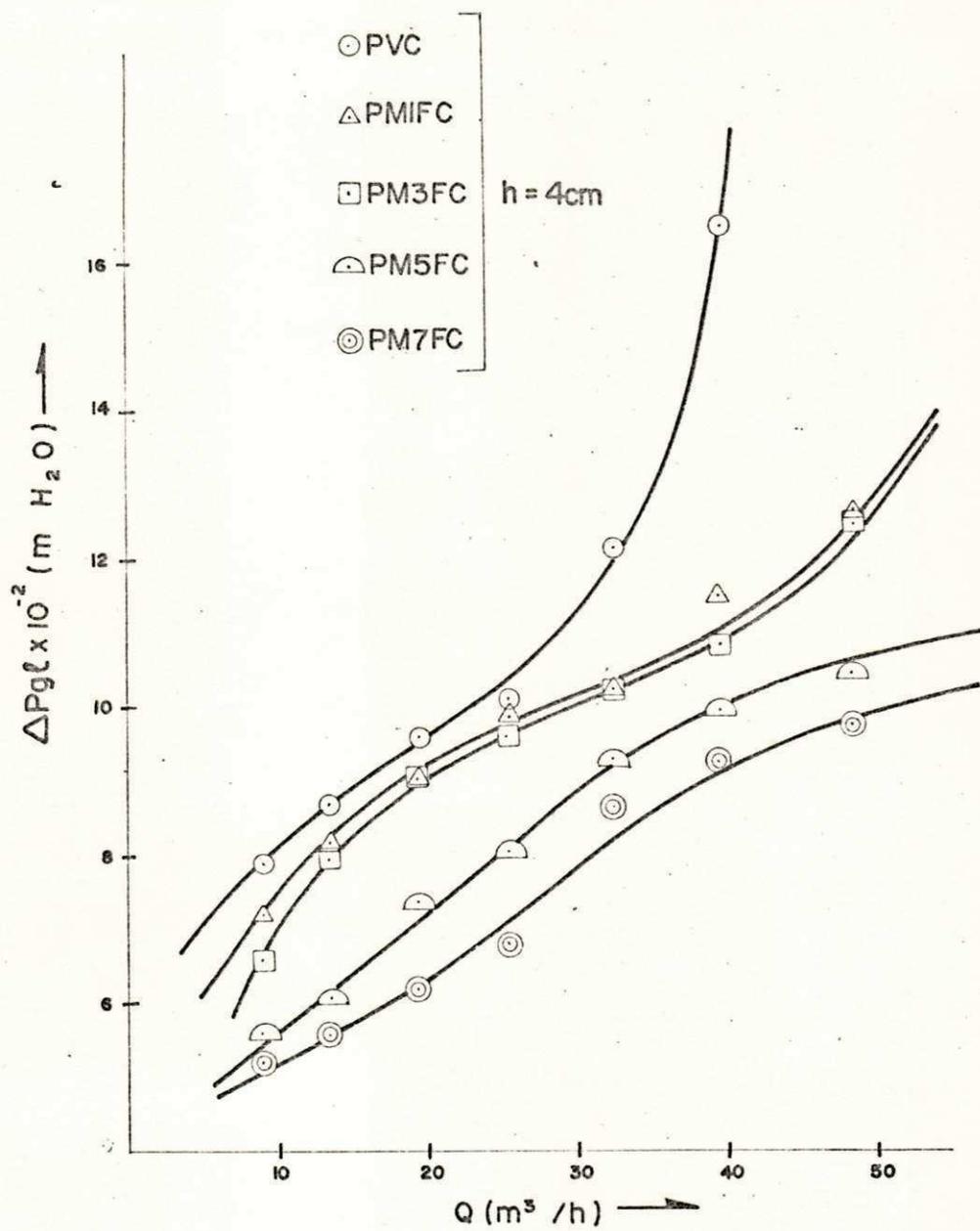


Figura 30- Comparação entre pratos valvulado e mistos do tipo C