

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RUBENS POUSA NETO

**DISTRIBUIDORES DE LÍQUIDOS TIPO TUBOS PARALELOS PERFURADOS
PARA COLUNAS DE ABSORÇÃO, ADSORÇÃO E DESTILAÇÃO: ANÁLISE
EXPERIMENTAL DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO**

SANTOS/SP

2016

RUBENS POUSA NETO

**DISTRIBUIDORES DE LÍQUIDOS TIPO TUBOS PARALELOS PERFURADOS
PARA COLUNAS DE ABSORÇÃO, ADSORÇÃO E DESTILAÇÃO: ANÁLISE
EXPERIMENTAL DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação da Profa. Dra. Marlene Silva de Moraes e coorientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

SANTOS / SP

2016

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Pousa Neto, Rubens.

Distribuidores de líquidos tipo tubos paralelos perfurados:
análise experimental da uniformidade de distribuição

Rubens Pousa Neto. – 2016

40 p.

Orientadora: Profa. Dra. Marlene Silva de Moraes

Coorientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP,
2016.

1. distribuidor de líquido. 2. tubos paralelos perfurados.
3. espinha de peixe. 4. uniformidade de dispersão

I.Moraes, Marlene. II.Moraes, Deovaldo. III. Distribuidores
de líquidos tipo tubos paralelos perfurados: análise
experimental da uniformidade de distribuição

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Antonio e Rozana e minha esposa Vanessa, pela confiança e todo o suporte, e para minhas filhas Giovanna e Júlia, por serem as minhas motivações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

A Deus por me permitir ter o privilégio de chegar até aqui.

À minha esposa Vanessa Alonso Pousa pelo apoio e suporte em toda minha trajetória, sendo uma pessoa fundamental em todas as minhas conquistas.

À minha mãe Rozana Massatelli Pousa pelo incentivo e confiança no meu sucesso, por todo carinho e palavras de conforto nos momentos difíceis.

À meu pai, o Msc. Antonio Pousa Neto, a quem me espelho desde sempre, por todos os conselhos e por ter me motivado a trilhar este caminho.

Ao amigo, engenheiro Matheus Oliveira Loyola de Souza, pelas sugestões e ajuda nas análises.

Ao prof Dr. Vitor Silva Rosa, pela contribuição nos estudos estatísticos com o programa Minitab.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior e Profa. Dra. Marlene Silva de Moraes, por todos os ensinamentos ao longo do mestrado e por acreditarem no meu trabalho.

Aos técnicos Vitor Dias, Volnei de Lemos e Irineu Penha da Ressureição, que ajudaram a montar a unidade experimental.

Aos estagiários do laboratório de pesquisa, Cristina Shimabuku, Bruna Graber, Milena Meireles, Matheus Myuri, Breno Dantas, Marcos Santana e Magda Martinez que formaram um time excepcional na realização dos experimentos.

EPÍGRAFE

*“Na Natureza nada se cria, nada se perde,
tudo se transforma”.*

Antoine Laurent de Lavoisier

RESUMO

Distribuidores de líquidos são amplamente usados na indústria em diversas aplicações. Existem poucas informações em literatura quanto ao dimensionamento adequado desse tipo de equipamento, evidenciando a necessidade de trabalhos acadêmicos na área. Este estudo apresentou um método experimental que possibilita a análise da uniformidade de distribuição de líquido em distribuidores do tipo tubos paralelos perfurados, também conhecidos como espinha de peixe.

Foram realizados ensaios que consistiram em bombear água de um reservatório para a coluna que possuía um distribuidor de líquido em seu topo, e coletar a massa de água no fundo da coluna, onde se encontravam 21 tubos verticais distribuídos ao longo do diâmetro da mesma.

Utilizaram-se nove distribuidores diferentes, com 12, 16, 20 furos, e diâmetros dos orifícios de 2 mm, 3mm e 4mm. Foram escolhidas três vazões diferentes para a realização dos ensaios, 700 L/h, 1050L/h e 1400 L/h.

Através dos dados obtidos em 81 ensaios por desvio padrão foi possível concluir que a condição com melhor uniformidade de dispersão foi utilizando o distribuidor com 20 furos e 2 mm de diâmetro em seus orifícios, com a vazão de 1050 L/h, sendo a maior influência determinada pelo número de furos. Foi proposto um modelo matemático validado estatisticamente que determina a uniformidade de distribuição em função da vazão, do diâmetro dos orifícios e número de furos.

Palavras chave: Distribuidores de Líquido. Tubos paralelos perfurados. Distribuidores espinha de peixe. Uniformidade de dispersão.

ABSTRACT

Liquid distributors are widely used in the industry in various applications. There is little information available in the literature regarding the adequate design of this type of equipment, evidencing the need for academic work in the area. This study presents an experimental method that allows the analysis of the uniformity of liquid distribution in ladder pipe distributors.

Experiments consisted of pumping water from a reservoir to the column that had the liquid distributor at its top, and collecting the water mass at the bottom of the column, where there were 21 vertical tubes distributed along the diameter of the column.

Nine different distributors were used, with 12, 16, 20 holes, and each one of them with 2 mm, 3 mm and 4 mm hole diameters. Three different flow rates were chosen for the tests, 700 L/h, 1050 L/h, 1400 L/h.

From the obtained data it was possible to conclude that the condition with the best dispersion efficiency was to use the distributor with 20 holes and 2 mm of diameter in its holes with the flow rate of 700 L/h, being the greater influence determined by the number of holes. It was proposed a statistically validated mathematical model that determines the uniformity of distribution as a function of flow rate, orifice diameter and number of holes.

Keywords: Liquid Distributor. Ladder pipe distributors. Uniformity of dispersion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Internos de uma coluna de absorção	15
Figura 2 – Distribuidor de líquido em uma coluna de destilação	17
Figura 3 – Chapa perfurada com passo quadrado	19
Figura 4 – Chapa perfurada com passo triangular	19
Figura 5 – Distribuidor do tipo chapa perfurada	20
Figura 6 – Distribuidor do tipo calha e vertedouro.....	21
Figura 7 – Formação de leques com bicos aspersores.....	22
Figura 8 – Distribuidor do tipo tubos paralelos perfurados	23
Figura 9 – Distribuidor do tipo tubos paralelos perfurados	23
Figura 10 – Unidade Experimental.	24
Figura 11 – Distribuidores do tipo espinha de peixe.....	25
Figura 12 – Coluna com tubos verticais para coleta do líquido.	26
Figura 13 – Rotâmetro.	26
Figura 14 – Manta acrílica para evitar respingos.....	27
Figura 15 – Dreno dos tubos coletores.	27
Figura 16 – Manômetro Digital.	28
Figura 17 – Método de estabilização da vazão	32
Figura 18 – Método com distribuidor fixo	33
Figura 19 – Planejamento Experimental.	35
Figura 20 – Dispersão de líquido na pior condição de distribuição.	38
Figura 21 – Dispersão de líquido na melhor condição de distribuição.	39
Figura 22 – Principais efeitos para o desvio padrão relativo.	41
Figura 23 – Efeito da interação entre as variáveis no desvio padrão relativo.	42
Figura 24 – Efeito do diâmetro e quantidade de furos no desvio padrão relativo..	42
Figura 25 – Efeito da quantidade de furos e da vazão no desvio padrão relativo.	43
Figura 26 – Efeito do diâmetro dos furos e da vazão no desvio padrão relativo. ..	43
Figura 27 – Gráficos residuais para o modelo não linear.	45
Figura 28 – Uniformidade de distribuição com vazão de 700 L/h.....	48
Figura 29 – Uniformidade de distribuição com vazão de 1050 L/h.....	48
Figura 30 – Uniformidade de distribuição com vazão de 1400 L/h.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Experimentos iniciais de validação do Rotâmetro.	29
Tabela 2 – Experimentos validação do método de coleta.	30
Tabela 3 – Critério de avaliação de Repetibilidade e Reprodutibilidade	31
Tabela 4 – Variável do Estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade.	31
Tabela 5 – Desvio entre leitura do rotâmetro e método de coleta.	32
Tabela 6 – Desvio para o método de estabilização da vazão.	33
Tabela 7 – Desvio para o método com distribuidor fixo.	34
Tabela 8 – Média do Desvio Padrão.	37
Tabela 9 – Pressão na alimentação do distribuidor.	40
Tabela 10 – Estimativa dos coeficientes do modelo matemático.	44
Tabela 11 – ANOVA da regressão não linear.	45
Tabela 12 – Uniformidade de distribuição calculada com modelo não linear.	47
Tabela 13 – Planejamento aleatório dos experimentos.	54
Tabela 14 – Dados experimentais.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

α, β, γ, k	–	Constantes do modelo não linear
ANOVA	–	Análise de variância
d	–	Diâmetro dos orifícios em mm
$\bar{m}$	–	Média das massas coletadas em g
N	–	Número de furos
PVC	–	Policloreto de vinila
Q	–	Vazão volumétrica em L/h
R ²	–	Coeficiente de determinação
RSD	–	Desvio padrão relativo em %
S	–	Desvio padrão em g
U	–	Uniformidade de distribuição em %

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Generalidades.....	13
1.2. Objetivos	13
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1. Colunas de Absorção	14
2.2. Colunas de Adsorção	15
2.3. Colunas de Destilação	16
2.4. Distribuidores de Líquidos	17
2.5. Tipos de distribuidores	18
2.5.1. Distribuidores de chapa perfurada.....	19
2.5.2. Distribuidores do tipo vertedor de calha	21
2.5.3. Distribuidores com bicos aspersores	22
2.5.4. Distribuidores de tubos paralelos perfurados	22
3. MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1. Equipamento e acessórios	25
3.2. Calibração do Rotâmetro	28
3.3. Validação do Método experimental	32
3.4. Procedimento experimental.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
APÊNDICE A.....	54
APÊNDICE B.....	55

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

Distribuidores de líquido são componentes essenciais em diversas aplicações industriais nas quais existe a necessidade de se absorver ou adsorver um gás, promover a lavagem do mesmo para retirada de impurezas, ou a refrigeração do próprio líquido. Como exemplo, pode-se citar a remoção do policloreto de vinila (PVC) na lavagem do gás cloreto de vinila proveniente dos reatores de polimerização; a remoção do mercúrio do ar proveniente das salas de células eletrolíticas na produção de cloro, através da lavagem com salmoura clorada; ou mesmo da refrigeração de água nas torres de resfriamento.

Existe uma gama de equipamentos, que requerem uma distribuição uniforme do líquido, sem caminhos preferenciais, de forma a garantir a máxima eficiência da operação, promovendo assim melhor transferência de massa, transferência térmica e controle de temperatura, menor perda de carga e consumo de energia no bombeamento (LIU et al., 2011).

Existem poucas informações em literatura sobre o tipo de distribuidor e a eficiência de dispersão. O trabalho de Moraes em 2008, que é um dos poucos trabalhos específicos que contemplam experimentalmente o distribuidor de tubos paralelos, foi base para o presente estudo.

1.2. Objetivos

O objetivo principal do trabalho foi avaliar experimentalmente a uniformidade de dispersão de líquido em distribuidores do tipo tubos paralelos. Com base no desvio padrão da massa coletada abaixo do distribuidor em diferentes pontos na base de uma coluna, visou-se:

- a) Definir a melhor condição de operação e o melhor distribuidor considerando-se o número e o diâmetro dos orifícios;
- b) Analisar a relação do desvio padrão com a vazão, pressão, número de furos, e diâmetro dos orifícios.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Os distribuidores de líquidos são normalmente empregados em colunas de adsorção, absorção e destilação, sendo responsável por realizar a alimentação do fluido em todo o diâmetro do equipamento.

Nesses processos é necessário promover o íntimo contato entre os componentes, utilizando-se para este propósito vários tipos de dispositivos tais como pratos e leitos de recheio (randômicos ou estruturados). E para garantir a eficiência das operações, é necessária a melhor distribuição de líquido possível ao longo do equipamento.

2.1. Colunas de Absorção

O processo de absorção ocorre através da remoção de uma ou mais substâncias presentes em uma corrente gasosa através do contato com um líquido, onde alguns desses componentes são solúveis no fluido e serão absorvidos, e outros, sendo essencialmente insolúveis, se mantêm na corrente gasosa. Para que ocorra a absorção, a solubilidade deve ser a mais alta possível entre as espécies (HOBLE, 1966).

O processo pode ocorrer de forma física, como na secagem do cloro realizada com remoção da umidade pelo ácido sulfúrico, ou na produção de ácido clorídrico através da absorção da água pelo gás cloreto de hidrogênio; e pode acontecer por reação química como na remoção de mercúrio do ar, onde este reage com o cloro presente na salmoura clorada para formar o cloreto de mercúrio.

Na Figura 1 é possível verificar os internos de uma coluna de absorção, com a presença de distribuidores de líquido na sua alimentação.

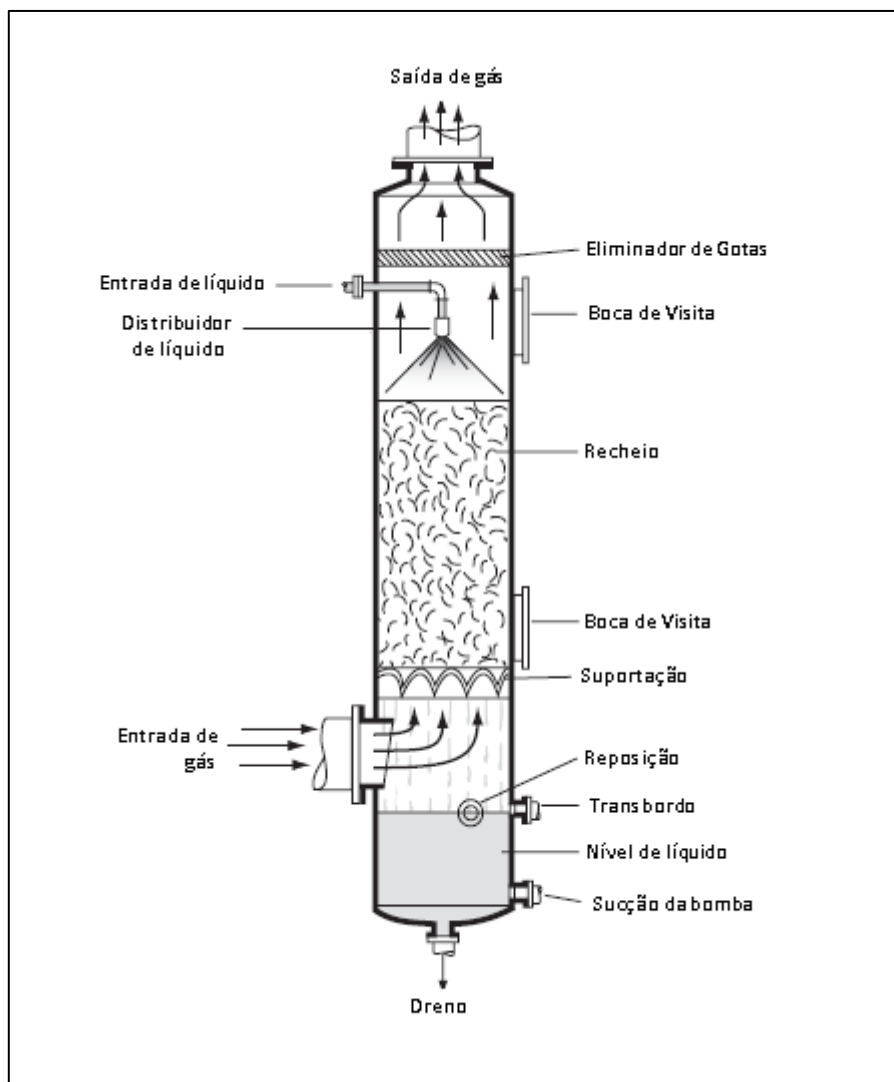


Figura 1 – Internos de uma coluna de absorção (SCHUTTE & KOERTING, 2007).

2.2. Colunas de Adsorção

A adsorção explora a capacidade de alguns sólidos de concentrar substâncias específicas presentes em soluções em suas superfícies. Dessa maneira, tanto em soluções gasosas quanto em soluções líquidas as espécies podem ser separadas uma das outras.

Por definição, a adsorção envolve o acúmulo ou a escassez de moléculas do soluto na interface, incluindo interfaces gás-líquido como nas espumas e em

interfaces líquido-líquido, como nos detergentes. Os adsorventes são materiais de origem natural ou materiais sintéticos amorfos ou com microestrutura cristalina definida (PERRY et al., 1999).

A adsorção é utilizada para favorecer a secagem do ar, remover odores e impurezas indesejáveis como dióxido de carbono, recuperação de vapores valiosos ao processo, e fracionar misturas de gases de hidrocarbonetos contendo substâncias como metano, etano, etileno, propileno e propano.

Típicas separações em líquidos incluem a remoção de umidade dissolvida na gasolina, descoloração dos produtos do petróleo, remoção de sabor e odor da água, entre outros. A distribuição do fluido na coluna de adsorção tem grande influência na eficácia da unidade.

2.3. Colunas de Destilação

A destilação é uma das principais operações utilizadas para purificação de fluidos em processos industriais. A operação propicia a separação dos componentes em uma mistura através da tendência que elas apresentam ao se concentrarem de forma diferente nas fases líquida e vapor, na mesma temperatura e pressão (CARVALHO & MOURA, 2009).

Os processos de destilação são largamente utilizados, sendo a aplicação mais conhecida na indústria petroquímica, na separação do petróleo em frações de hidrocarbonetos com diferentes gamas de peso molecular. Porém, diversos outros processos industriais utilizam a destilação, como a produção de etanol, a produção de polímeros, as indústrias alimentares e farmacêuticas, a reciclagem de óleos, entre outros.

A Figura 2 ilustra um distribuidor de líquido na alimentação de uma coluna de destilação.

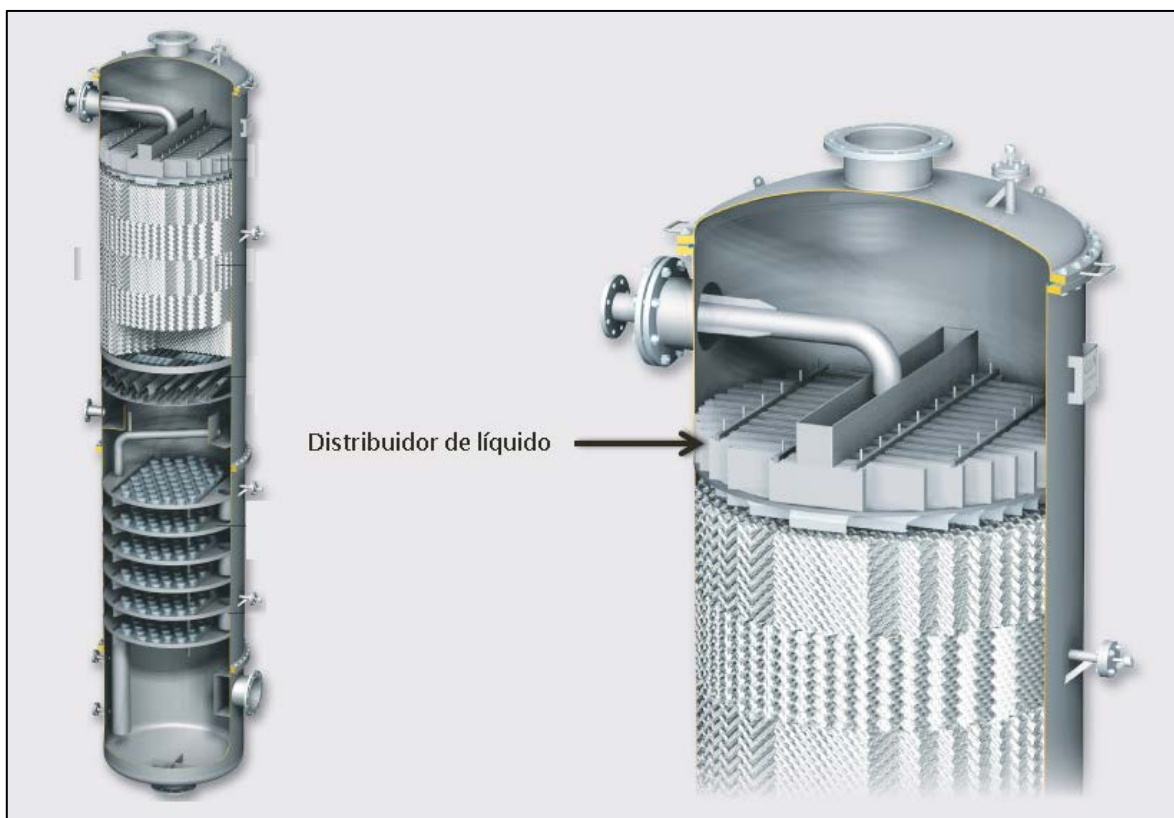


Figura 2 – Distribuidor de líquido em uma coluna de destilação (GEA, 2016).

2.4. Distribuidores de líquidos

Conforme citado, a uniformidade de distribuição é essencial para operações em torres de absorção, colunas de recheio, torres de resfriamento, lavadores de gases, colunas de troca iônica, colunas de destilação, e demais aplicações. Diversas variáveis determinam como será a saída do fluido dos distribuidores, como a altura, a quantidade e geometria dos orifícios, densidade e vazão do fluido (HEGGEMANN et al., 2007).

No dimensionamento, além da busca pela uniformidade, é importante ser considerado o fato de que as incrustações podem obstruir os orifícios do distribuidor. Quanto mais alto for localizado o distribuidor no equipamento e maior forem os orifícios, melhor será a resistência quanto às obstruções. Normalmente, quanto maior for o orifício, também haverá uma pressão mais moderada, que

tipicamente ocasiona uma qualidade menor da distribuição do líquido. Assim, é preciso encontrar um ponto ideal entre o tamanho do orifício e a qualidade aceitável de distribuição. A melhor forma para se chegar a esse ponto de melhor rendimento é realizando testes de verificação com distribuidores diversos. (DHABALIA & PILLING, 2006).

Existem duas categorias de distribuidores de líquido, os gravitacionais e os pressurizados, com ambos podendo ser aplicados em distintos processos. Devendo-se, todavia, avaliar as características de cada um deles e as necessidades do projeto em questão durante o dimensionamento (BOZZANO; DENTE; MANENTI, 2014).

Para situações nas quais o projeto prevê colunas com diâmetros pequenos, com um tubo central de alimentação, vários projetos de distribuidores se tornariam aplicáveis; porém no caso de colunas com diâmetros maiores, faz-se necessário o adequado dimensionamento do distribuidor, para atingir uma distribuição uniforme em diferentes pontos de operação, variando as taxas de fluxo de líquido. Esses projetos são realizados respeitando-se uma regra empírica para uma boa distribuição: o número de orifícios por área de torre tem que ser maior que um valor mínimo por metro quadrado, sendo este de 43 orifícios conforme Silvey e Keller (1969) e Frank (1977); 60 pontos conforme Veer (1979) e ainda 108 furos segundo Chen (1984) e Ludwig (1993).

2.5. Tipos de distribuidores

Dos diversos tipos de distribuidores existentes, os mais encontrados na indústria são os distribuidores de chapa perfurada e chaminé, do tipo vertedor de calha, com bicos aspersores, e de tubos paralelos perfurados (MORAES et al., 2008).

2.5.1. Distribuidores de chapa perfurada

Distribuidores do tipo chapa perfurada utilizam-se de lâminas (placas, folhas) normalmente metálicas, com orifícios em sua superfície. Existe uma grande diversidade de tipos de perfurações que permitem projetos específicos.

Na perfuração com disposição reta, mostrada na Figura 3, a área encontrada dos orifícios é sempre menor quando comparada à área obtida na perfuração com disposição alternada, conforme mostrado na Figura 4. Dessa forma, a utilização da disposição alternada é a mais recomendada para processos industriais, visto que possui um melhor aproveitamento da superfície perfurada (FUROEXPRESS, 2016).

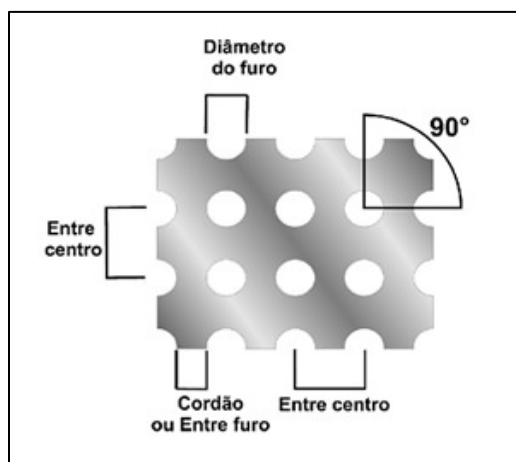


Figura 3 – Chapa perfurada com passo quadrado (FUROEXPRESS, 2016).

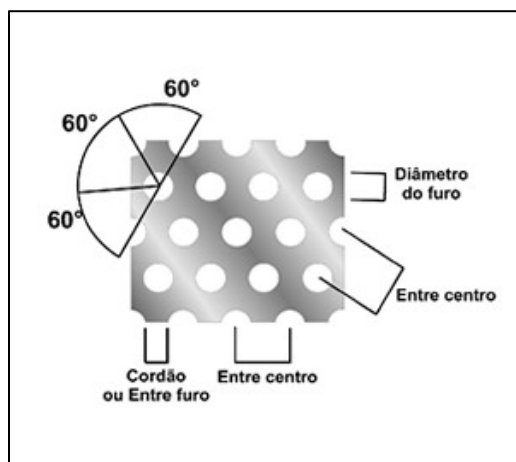


Figura 4 – Chapa perfurada com passo triangular (FUROEXPRESS, 2016).

Esse tipo de distribuidor é construído de modo que se forme um nível de líquido acima da chapa perfurada, para que ocorra a distribuição de maneira uniforme, sendo bastante empregados em colunas como redistribuidor entre seções de recheio, devido a não ser necessário operarem sob pressão. Como é possível observar na Figura 5, a distribuição encontra-se na chaminé, distante da alimentação e, dessa forma, este distribuidor é bastante recomendado para aplicações onde existe a geração de espuma (MORAES, 2008).

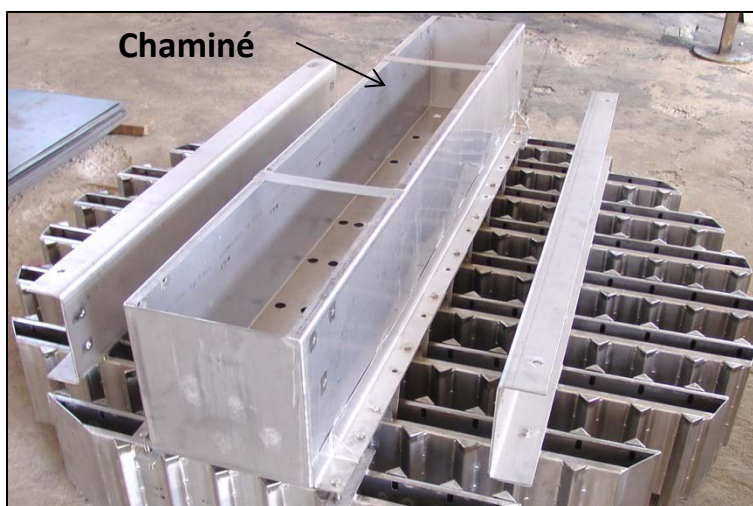


Figura 5 – Distribuidor do tipo chapa perfurada (SERMAT, 2016).

Durante a operação, é necessário que o fluxo de líquido se mantenha dentro da faixa especificada em projeto com poucas variações, pois o aumento pode implicar em transbordo e a redução pode permitir que alguns orifícios sequem, possibilitando o fluxo de gás no sentido contrário e a perda da uniformidade de distribuição do líquido (CALDAS et al., 2003).

Os distribuidores do tipo chapa perfurada são bastante suscetíveis a inclinações e a obstruções, sendo usual a utilização de filtros na alimentação, e em alguns casos sistemas de “flushing” para limpeza periódica dos orifícios, os quais são instalados abaixo dos distribuidores, posicionados em direção aos orifícios, e projetam jatos de água com alta pressão para evitar entupimentos.

A aplicação deste tipo de distribuidor é utilizada normalmente em torres com diâmetro superior a 50 cm (CALDAS et al., 2003) e o número de orifícios para garantir a irrigação uniforme se encontra na faixa de 60 a 100 furos por metro quadrado (KOCH-GLITSCH, 2016, KOLEV, 2006).

2.5.2. Distribuidores do tipo vertedor de calha

O distribuidor de líquido tipo vertedor de calha é formado por um sistema com calhas e tubos curvos pelos quais o líquido escoar para o recheio, conforme Figura 6.

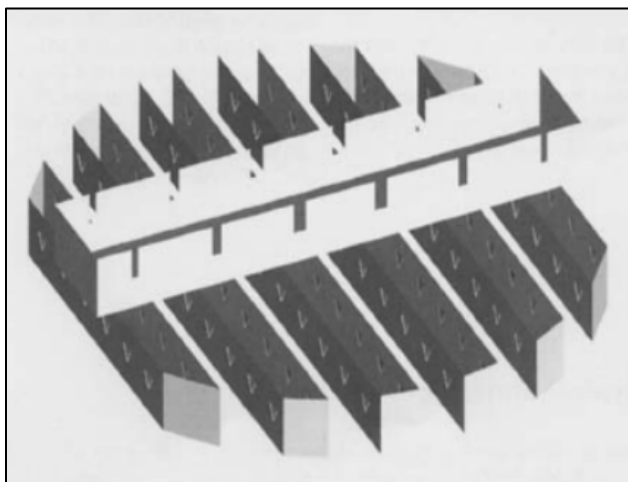


Figura 6 – Distribuidor do tipo calha e vertedouro (KOLEV, 2006).

Este tipo de distribuidor possibilita altas taxas de irrigação e consequentemente o equipamento aumenta a capacidade das torres, permitindo projetos que se favorecem com maiores velocidades de gás e menores leitos recheados, otimizando custos com equipamento e com operação. É bastante utilizado para líquidos que possuem sólidos suspensos, como resíduos de corrosão, por ser menos propenso a entupimentos.

Não são recomendados quando existe a formação de espumas, e não garantem a uniformidade de distribuição.

2.5.3. Distribuidores com bicos aspersores

Os bicos aspersores são largamente utilizados na indústria em aplicações como lavagem de gases para remoção de espumas e sólidos que são arrastados devido às altas velocidades dos gases. A escolha deste tipo de distribuidor de líquido é adequada quando o fluxo de fluido é baixo em relação à área que se necessita molhar.

São dimensionados para garantir um leque de abertura com ângulos pré-determinados, como se pode visualizar na Figura 7, sendo necessária a operação com pressões elevadas para garantir a dispersão desejada. É um tipo de distribuidor bastante vulnerável a obstruções, sendo recomendável a alimentação deste com fluidos pouco incrustantes e filtrados.

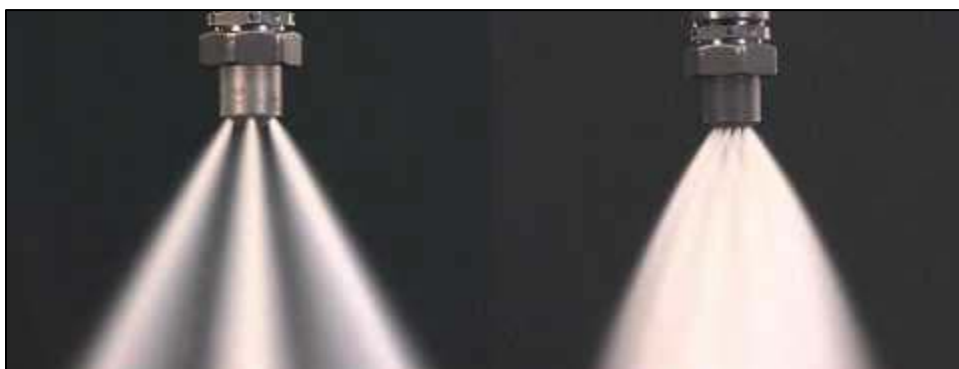


Figura 7 – Formação de leques com bicos aspersores (SPRAYING SYSTEMS, 2016).

2.5.4. Distribuidores de tubos paralelos perfurados

Os distribuidores de líquidos do tipo tubos paralelos são formados por um tubo principal com ramificações laterais (Figuras 8 e 9), sendo uma configuração que promove alta densidade de irrigação. Com um posicionamento uniforme dos orifícios de irrigação ao longo dos tubos, este equipamento permite uma maior capacidade de gás resultando em baixos custos de operação para a planta.

Devido à sua construção simples e facilidade de instalação, é amplamente utilizado na indústria. A uniformidade de distribuição é determinada pelo fluxo de líquido, a pressão de operação além da quantidade e diâmetro dos furos.

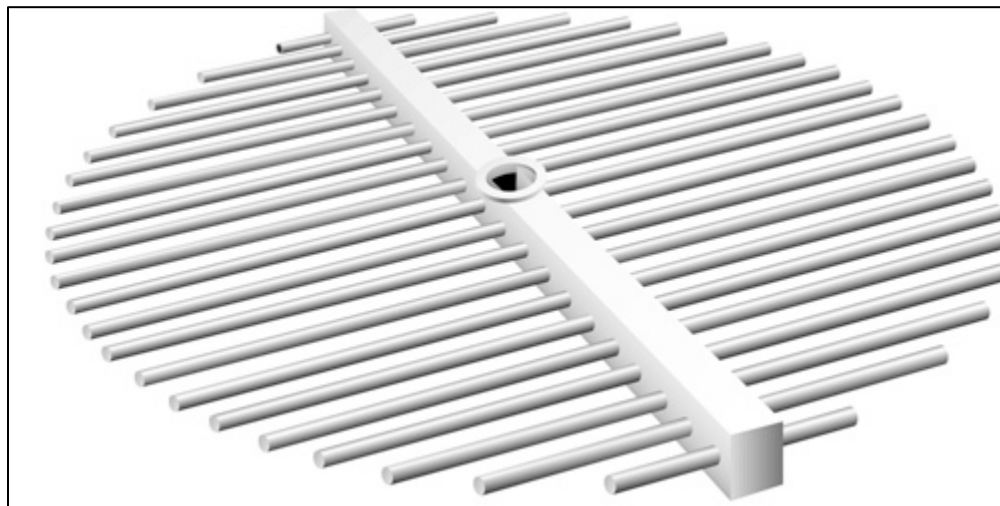


Figura 8 – Distribuidor do tipo tubos paralelos perfurados (AMACS, 2016).



Figura 9 – Distribuidor do tipo tubos paralelos perfurados (BEGG COUSLAND, 2016).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em uma unidade experimental construída no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília.

A unidade desenvolvida reproduz, em escala piloto, uma condição operacional de lavagem de gás similar a uma torre de absorção, conforme se pode observar na Figura 10.



Figura 10 – Unidade experimental projetada e construída na Universidade Santa Cecília:
a) distribuidor de líquido, b) tanque de acrílico, c) bomba submersa, d) válvulas manuais, e) filtro, f) coluna de acrílico g) tubos coletores, h) chapa perfurada, i) rotâmetro, j) manta acrílica, k) mangueiras de silicone e l) manômetro.

3.1. Equipamento e acessórios

O equipamento era formado por:

- a) Nove distribuidores do tipo tubo paralelo perfurado, que era substituído a cada experimento para análise da dispersão (Figura 11);

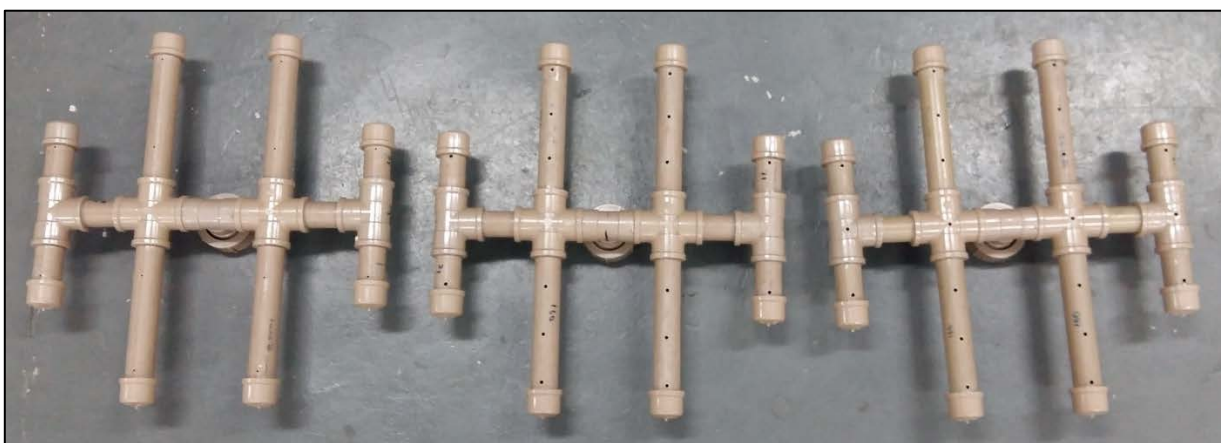


Figura 11 – Distribuidores do tipo espinha de peixe.

- b) Um tanque de acrílico de 154 litros;
- c) Uma bomba submersa ANAUGER modelo 900 com capacidade de $2,3\text{m}^3/\text{h}$;
- d) Duas válvulas manuais utilizadas no direcionamento do líquido bombeado para o distribuidor de líquido na coluna e para o reciclo;
- e) Um filtro de tecido sintético, envolvendo a bomba para evitar a presença de partículas na sucção e ao longo do sistema de distribuição;
- f) Uma coluna de acrílico 400 mm de diâmetro e 410 mm de altura;
- g) Vinte e um tubos coletores de acrílico situados na parte inferior da coluna com 800 mm de altura e 52 mm de diâmetro, dispostos com arranjo quadrático e passo de 74 mm (Figura 12);
- h) Uma chapa perfurada de inox com orifícios de 20 mm de diâmetro, arranjo triangular e passo de 22 mm, suportando a manta acrílica;
- i) Um rotâmetro com escala de 0 a 3500 L/h (Figura 13);



Figura 12 – Coluna com tubos verticais para coleta do líquido.



Figura 13 – Rotâmetro.

- j) Uma manta acrílica de 50 mm de espessura localizada logo abaixo do distribuidor para evitar as perdas por respingos (Figura 14);

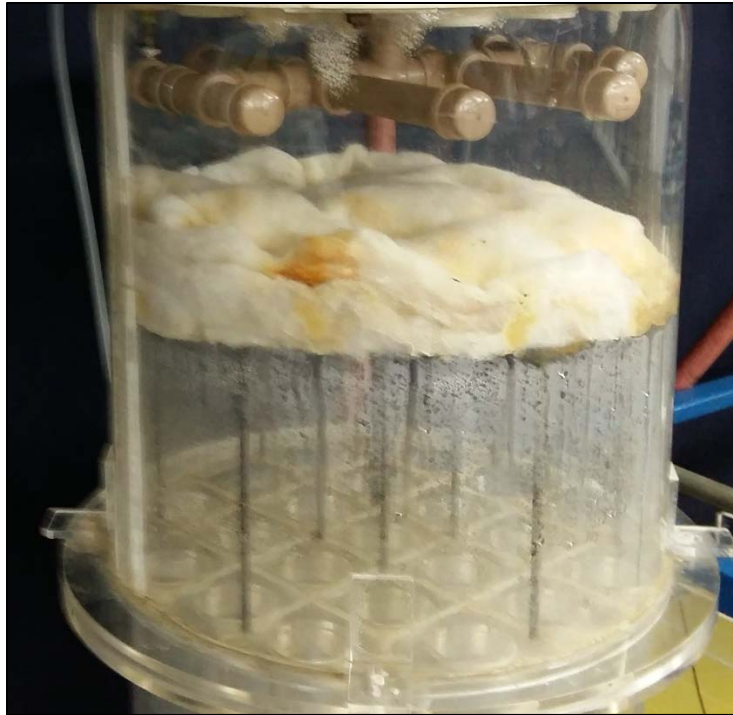


Figura 14 – Manta acrílica para evitar respingos.

- k) Vinte e uma mangueiras de silicone que funcionaram como dreno dos tubos coletores (Figura 15);

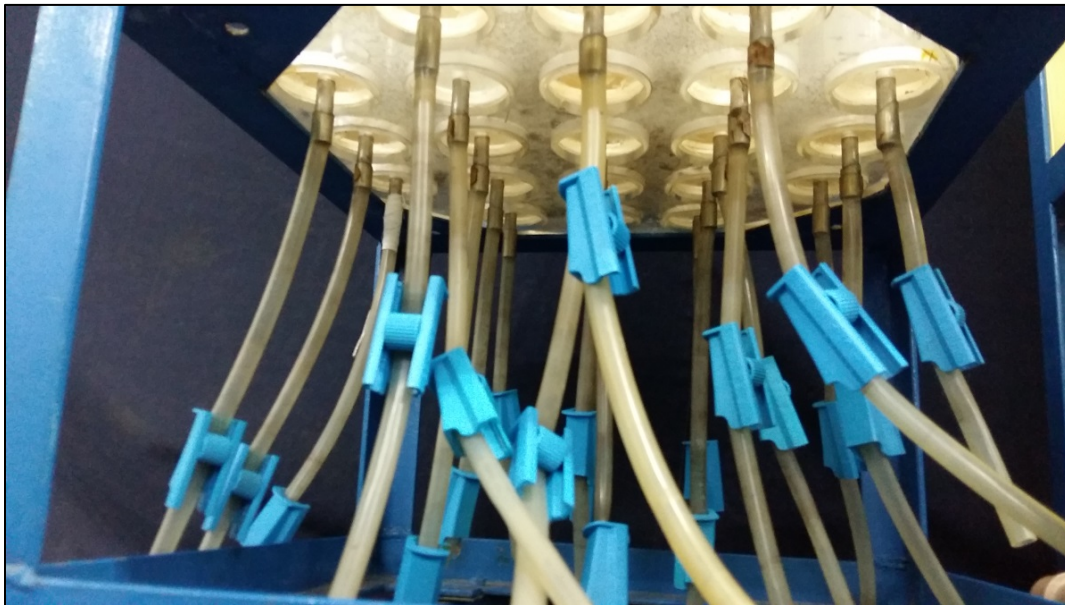


Figura 15 – Dreno dos tubos coletores.

- l) Um manômetro digital AGATEC na alimentação do distribuidor com escala de 0 a 10 kgf/cm² e divisões de 0,01 kgf/cm² (Figura 16);



Figura 16 – Manômetro Digital.

Foram utilizados distribuidores distintos, com quantidades iguais a 12, 16 e 20 furos, que representam uma relação de 95, 127, 159 orifícios por metro quadrado; e diâmetros dos furos de 2, 3 e 4 mm totalizando nove distribuidores diferentes.

Os valores de vazão dos experimentos foram de 700, 1050 e 1400 L/h, sendo que a maior vazão empregada foi escolhida após a realização de testes com o distribuidor de maior restrição, com 12 furos de 2 mm, que atingiu 1500 L/h, e a menor vazão foi determinada a partir da precisão do rotâmetro, que apresentou bons resultados a partir de 700 L/h.

3.2. Calibração do Rotâmetro

Como todo o experimento se baseia na leitura realizada no rotâmetro, foi realizada uma sequência de ensaios, que visaram avaliar a precisão do instrumento. Inicialmente foi avaliada toda a faixa de medição do rotâmetro, através da comparação da leitura do mesmo com a vazão calculada através da técnica da massa por unidade de tempo. Esses ensaios foram realizados em duplicata e com dois grupos diferentes de operadores. A Tabela 1 mostra os dados destes experimentos iniciais de avaliação do medidor de vazão.

Tabela 1 – Experimentos iniciais de validação do Rotâmetro.

Operadores	Vazão Leitura (L/h)	Tempo (s)	Massa (g)	Vazão Ensaio (L/h)	Desvio (%)
1	350	66,78	7480	403,2	13,20
		60,90	6800	402,0	12,93
	700	38,55	7820	730,3	4,15
		34,69	6920	718,1	2,52
	1050	26,05	7570	1046,1	0,37
		25,57	7540	1061,6	1,09
	1400	22,57	8620	1374,9	1,82
		20,36	8000	1414,5	1,03
	1750	16,72	7900	1701,0	2,88
		17,75	8260	1675,3	4,46
	2100	11,00	6400	2094,5	0,26
		14,78	8380	2041,1	2,88
2	350	70,58	7780	396,8	11,80
		78,68	8670	396,7	11,77
	700	44,75	9040	727,2	3,75
		38,72	7760	721,5	2,98
	1050	31,00	9140	1061,4	1,08
		36,64	10760	1057,3	0,70
	1400	24,99	8880	1279,2	9,44
		23,74	9030	1369,6	2,22
	1750	19,63	9040	1658,3	5,53
		19,56	9290	1709,8	2,35
	2100	16,84	10000	2137,8	1,77
		16,99	9780	2072,3	1,34

Foi observado que na faixa de 350 L/h os erros eram muito altos, portanto limitou-se o ponto inferior de operação do rotâmetro em 700L/h. Utilizando-se o distribuidor com 12 furos e 2 mm de diâmetro dos orifícios, sendo esse o de maior restrição, obteve-se uma vazão máxima de aproximadamente 1500 L/h. Dessa forma, definiu-se o limite superior do rotâmetro em 1400 L/h, e escolheu-se o valor intermediário da faixa para o terceiro ponto de operação, 1050 L/h. A partir da definição da faixa de operação, foram realizados os experimentos para a aferição do rotâmetro, apenas na faixa de trabalho, conforme os dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Experimentos validação do método de coleta.

Operadores	Vazão Leitura (L/h)	Tempo (s)	Massa (g)	Vazão ensaio (L/h)	Desvio (%)
1	700	41,61	8230	712,0	1,69
		34,69	6920	718,1	2,52
		21,39	4230	711,9	1,67
	1050	25,57	7540	1061,6	1,09
		26,05	7570	1046,1	0,37
		17,72	5230	1062,5	1,18
	1400	22,57	8620	1374,9	1,82
		20,36	8000	1414,5	1,03
		15,41	5910	1381,1	1,37
2	700	42,39	8340	708,3	1,17
		45,12	8940	713,2	1,85
		36,73	7220	707,7	1,08
	1050	27,66	8160	1062,0	1,13
		27,78	8160	1057,5	0,70
		29,08	8700	1077,2	2,53
	1400	21,57	8220	1372,2	2,02
		21,50	8230	1378,0	1,59
		20,85	7980	1378,2	1,58
3	700	44,48	8820	713,8	1,94
		45,71	9120	718,3	2,55
		49,71	9760	706,9	0,97
	1050	24,50	7220	1060,9	1,03
		23,59	6920	1056,0	0,57
		24,69	7280	1061,5	1,08
	1400	20,15	7954	1421,1	1,48
		16,87	6590	1406,3	0,45
		20,68	8010	1394,4	0,40

O estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade considera que quando se obtém uma porcentagem da variável de estudo abaixo de 30% tem-se um bom método e abaixo de 10% pode-se considerar o método ótimo conforme apresentado na Tabela 3 (AIAG, 2010).

Tabela 3 – Critério de avaliação de Repetibilidade e Reprodutibilidade (AIAG, 2010).

Variável de Estudo	Decisão	Comentários
Abaixo de 10%	Geralmente considerado um Sistema de medição aceitável	Recomendado, especialmente quando se precisa de controle de processo mais apurado.
Entre 10% e 30%	Pode ser aceito em algumas aplicações	A decisão precisa ser feita baseado na importância da aplicação, custo para implementação de melhorias no método.
Acima de 30%	Considerado inaceitável	Todo esforço deve ser concentrado para melhorar o método.

Foi aplicada esta análise através do programa estatístico Minitab no método de coleta da massa em recipiente de polímero com tempo conhecido para o cálculo da vazão, e atingiu-se 3,80% da variável de estudo, garantindo que o método de coleta é bastante eficaz. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos no estudo de repetibilidade e reprodutibilidade.

Tabela 4 – Variável do Estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade.

Fonte	Desvio Padrão (DP)	Percentual da variável do estudo (%VE)
Total de R&R da Medição	12,896	3,80
Repetibilidade	9,998	2,94
Reprodutibilidade	8,146	2,40
Variação Total	339,707	100,00

Com isso, empregou-se de forma segura a média dos dados para cada vazão na comparação com as leituras no rotâmetro. Na Tabela 5 pode-se ver o desvio de cada ponto de vazão selecionado para o experimento.

Tabela 5 – Desvio entre leitura do rotâmetro e método de coleta.

Vazão Ensaio (L/h)	Vazão Leitura (L/h)	Desvio (%)
712,3	700,0	1,75
1060,6	1050,0	1,01
1391,2	1400,0	0,63

3.3. Validação do Método experimental

Foram propostos dois métodos para realização do experimento, o primeiro estabilizando-se a vazão através da válvula de reciclo para posteriormente colocar o distribuidor rapidamente no seu local de operação no topo da coluna (Figura 17). Acreditava-se que esse método seria efetivo, pois poderia minimizar os erros ao garantir a vazão do início ao fim do experimento.

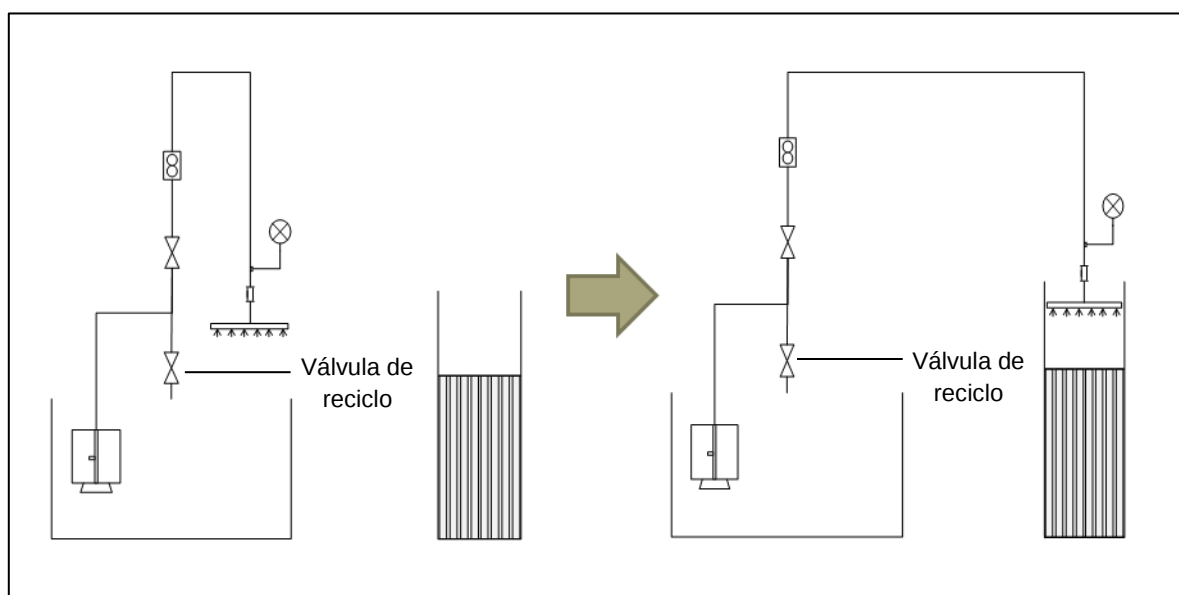


Figura 17 – Método de estabilização da vazão

O segundo método, foi realizado mantendo fixo o distribuidor ao longo do experimento, no qual se acreditava existir um erro decorrente do tempo até de se atingir a vazão no começo da operação (Figura 18).

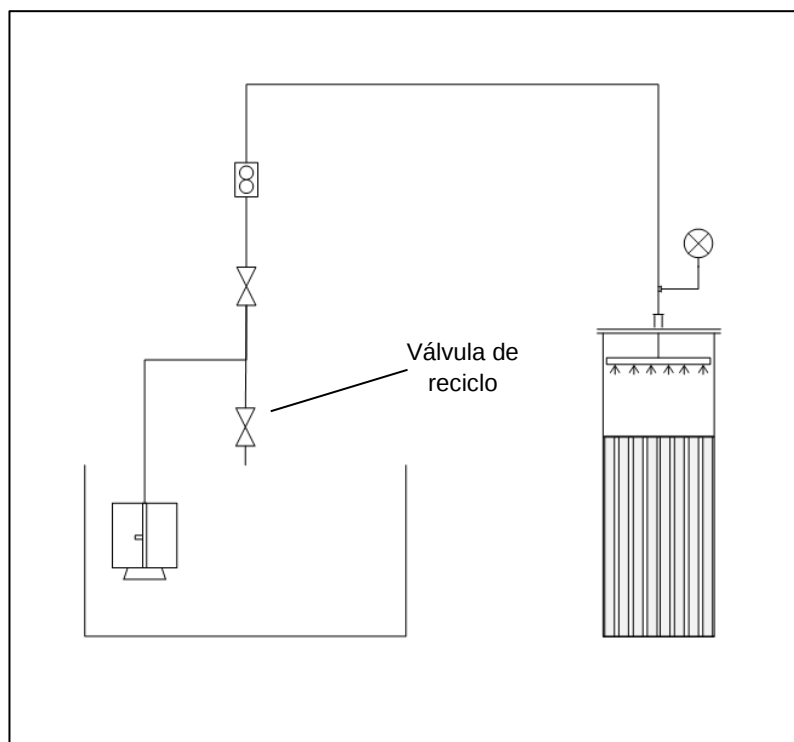


Figura 18 – Método com distribuidor fixo

A Tabela 6 mostra os ensaios realizados e os resultados obtidos, utilizando o método de estabilização da vazão, e a Tabela 7 apresenta os testes realizados em duplicata para o método com distribuidor fixo.

Tabela 6 – Desvio para o método de estabilização da vazão.

Furos	Diâmetro (mm)	Vazão Leitura (g/s)	Massa (g)	Tempo (s)	Vazão Experimental (g/s)	Desvio (%)
12	2	388,9	14440	36,50	395,6	1,73
16	3	388,9	11910	31,43	378,9	2,56
20	4	388,9	13740	37,66	364,8	6,18

Tabela 7 – Desvio para o método com distribuidor fixo.

Furos	Diâmetro (mm)	Vazão Leitura (g/s)	Massa (g)	Tempo (s)	Vazão Experimental (g/s)	Desvio (%)
12	2	388,9	14480	36,47	397,0	2,10
			17020	44,94	378,7	2,61
16	3	388,9	16800	42,84	392,2	0,84
			13080	33,03	396,0	1,83
20	4	388,9	17725	44,41	399,1	2,63
			18670	46,81	398,8	2,56

Ambos os métodos podem ser utilizados sem a geração de erros experimentais, considerando que os desvios encontrados são pequenos e possivelmente ocasionados pela precisão na leitura do rotâmetro. Foi escolhido o método fixo devido à facilidade de operação e por necessitar de apenas duas pessoas na condução dos ensaios, enquanto no método de estabilização de vazão eram necessários três operadores.

3.4. Procedimento experimental

O procedimento experimental consistiu em colocar o distribuidor de tubos paralelos selecionado em cada ensaio no topo da coluna, garantindo o posicionamento do distribuidor, com eixo principal alinhado conforme algumas marcações na tampa da coluna.

Com a coluna e os tubos coletores drenados, ligava-se a bomba sempre com a válvula de reciclo aberta e a da coluna fechada. Em todos os ensaios foi mantido o nível mínimo do tanque para assegurar o funcionamento adequado da bomba.

Após as operações supracitadas abria-se a válvula da coluna, e na sequência fechava-se a válvula de reciclo parcialmente até atingir a vazão do

experimento em questão. No instante em que começava a escoar líquido pelos orifícios do distribuidor iniciava-se a contagem do tempo.

Nesse momento era realizada a leitura de pressão na alimentação do distribuidor, com a vazão mantida fixa. Após 40 segundos a válvula de reciclo era aberta, e a da coluna fechada, cessando a alimentação de líquido. Em uma segunda etapa do experimento se coletava a água em cada um dos 21 tubos para obtenção da massa.

Foram planejados 27 experimentos em triplicata, para permitir a obtenção do erro experimental. Através desse erro foi possível verificar se as diferenças encontradas nos dados são estatisticamente diferentes. Planejaram-se os experimentos de forma aleatória, com a finalidade de garantir a distribuição imparcial. A Figura 19 mostra o planejamento dos experimentos.

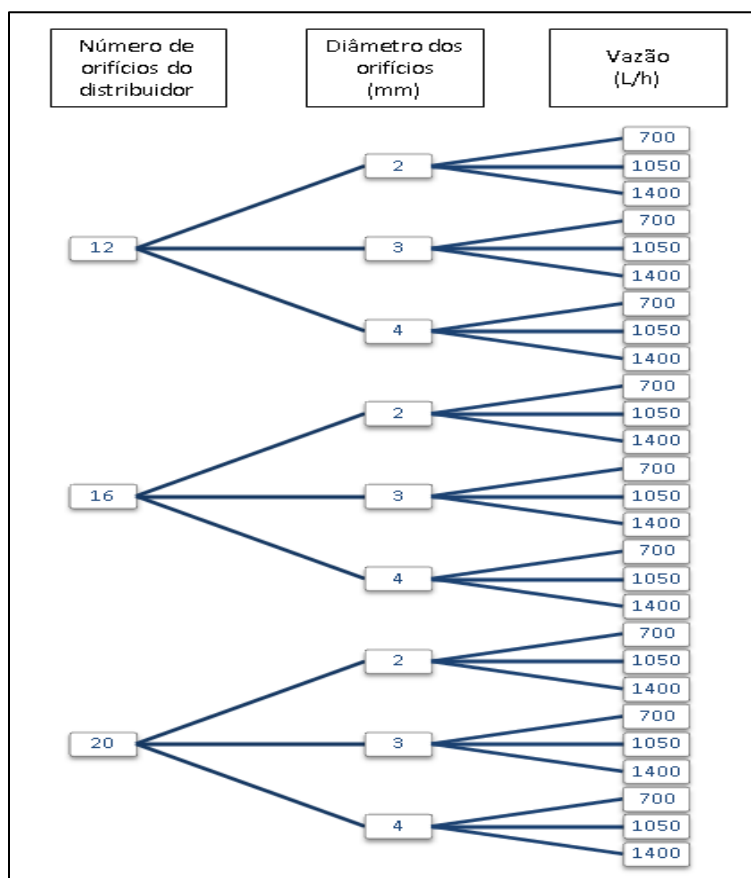


Figura 19 – Planejamento Experimental.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados apresentados no Apêndice B avaliou-se a dispersão do líquido através do cálculo do desvio padrão entre as massas coletadas em cada ensaio.

O desvio padrão pode ser calculado através da equação 1.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - m)^2}{n - 1}} \quad (1)$$

Em que:

S é o desvio padrão em g;

m é a média das massas coletadas em g;

n é o número de amostras, referente a cada tubo.

A equação 2 apresenta o desvio padrão relativo obtido pela razão entre o desvio padrão e a média das massas.

$$RSD = \frac{S}{\bar{m}} \quad (2)$$

Sendo:

RSD o percentual de desvio padrão relativo;

S o desvio padrão em g;

$\bar{m}$ a média das massas coletadas em g.

O desvio padrão e o desvio padrão relativo foram determinados para cada um dos experimentos pela média da triplicata conforme indicado na Tabela 8. Através dessa análise pode-se identificar a melhor condição de operação com menor desvio padrão relativo que foi utilizando o distribuidor de 20 furos com 2 mm e vazão de 1050 L/h e a pior condição com o distribuidor de 16 furos e 4 mm com a vazão de 700 L/h.

Tabela 8 – Média do Desvio Padrão.

Quantidade de furos	Diâmetro dos furos (mm)	Vazão (L/h)	Desvio Padrão (g)	Desvio Padrão Relativo (%)
12	2	700	183,5	51,07
		1050	268,2	47,98
		1400	386,3	52,81
	3	700	187,3	51,13
		1050	274,5	50,72
		1400	372,4	53,35
	4	700	192,7	49,46
		1050	269,2	49,18
		1400	350,1	48,69
16	2	700	212,3	53,26
		1050	300,5	55,22
		1400	366,6	52,36
	3	700	218,4	57,75
		1050	299,6	55,07
		1400	401,7	57,30
	4	700	228,8	59,31
		1050	324,2	56,99
		1400	399,0	55,27
20	2	700	139,9	39,18
		1050	175,0	32,66
		1400	240,1	33,34
	3	700	164,9	44,70
		1050	206,9	36,49
		1400	246,4	33,94
	4	700	155,0	38,46
		1050	239,5	40,13
		1400	244,5	32,99

Na Figura 20 pode-se observar a análise de dispersão do ensaio com a pior condição encontrada, com o distribuidor de 16 furos, 4 mm de diâmetro nos orifícios e vazão de 700 L/h. Nesse ensaio verifica-se que a distribuição foi pior no centro da coluna. Isso ocorreu devido ao fato de não existirem furos ao longo do tubo principal do distribuidor, apenas nas ramificações.

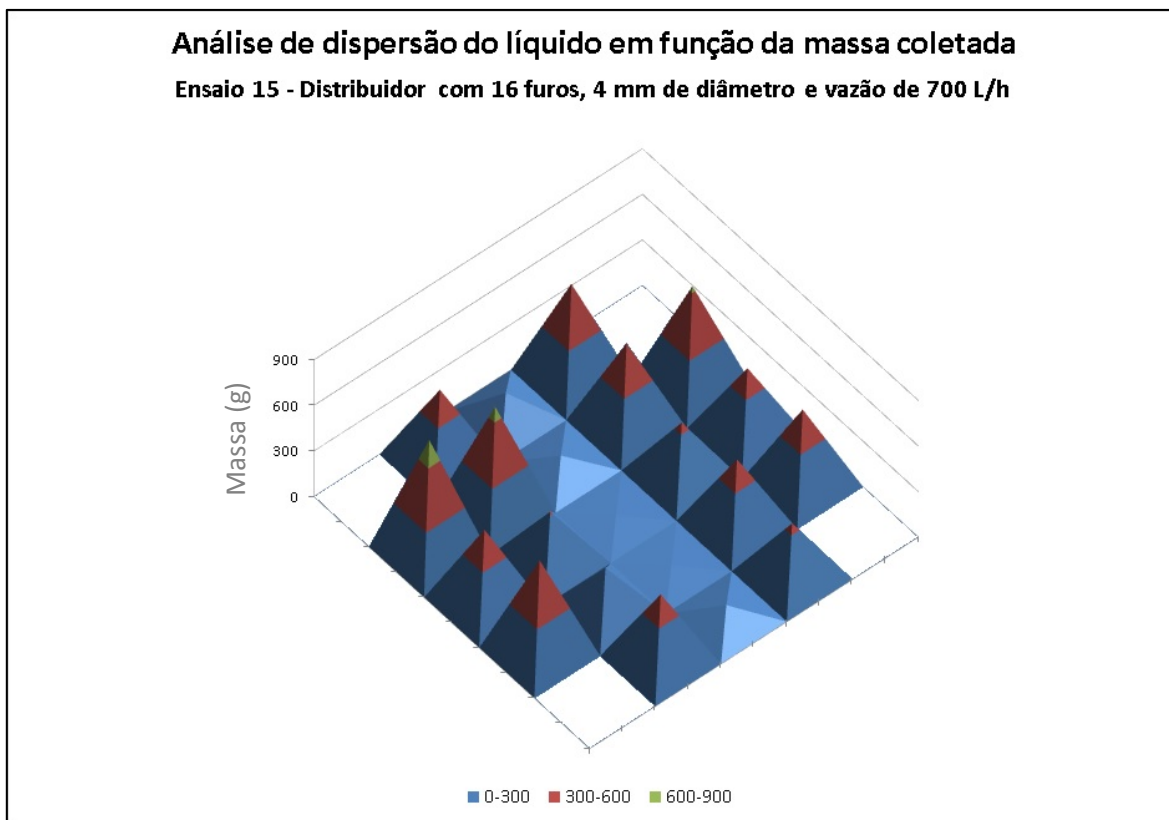


Figura 20 – Dispersão de líquido na pior condição de distribuição.

Na Figura 21, obtida a partir do ensaio com o distribuidor de líquido com 20 furos, 2 mm de diâmetro nos orifícios e 1050 L/h observa-se a melhor condição quanto à uniformidade de distribuição, devido ao maior número de furos.

Análise de dispersão do líquido em função da massa coletada

Ensaio 32 - Distribuidor com 20 furos, 2 mm de diâmetro e vazão de 1050 L/h

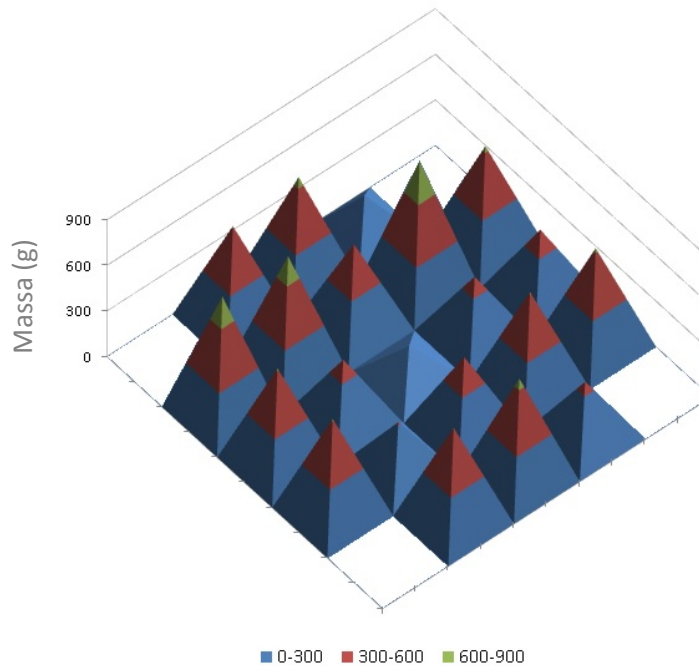


Figura 21 – Dispersão de líquido na melhor condição de distribuição.

Em cada experimento registrou-se a pressão na alimentação do líquido. Os valores encontrados podem ser verificados na Tabela 9. Os dados encontrados se comportaram de forma aleatória, não caracterizando uma tendência, e dessa forma não foi possível relacionar a pressão com a uniformidade de distribuição através do desvio padrão.

Essa análise pode ser verificada na Figura 22, juntamente com os efeitos gerados pelo número de furos, diâmetro dos orifícios e a vazão empregada em cada ensaio, realizado no programa Minitab.

Tabela 9 – Pressão na alimentação do distribuidor.

Quantidade de furos	Diâmetro (mm)	Vazão (L/h)	Pressão (kgf/cm ²)		
			Ensaio 1 ao 27	Ensaio 28 ao 54	Ensaio 55 ao 81
12	2	700	0,40	0,39	0,38
		1050	0,9	0,82	0,86
		1400	1,53	1,6	1,67
	3	700	0,10	0,09	0,07
		1050	0,19	0,18	0,18
		1400	0,31	0,33	0,32
	4	700	0,02	0,04	0,06
		1050	0,06	0,06	0,07
		1400	0,10	0,07	0,13
16	2	700	0,2	0,22	0,25
		1050	0,45	0,05	0,5
		1400	0,82	0,78	0,88
	3	700	0,04	0,06	0,02
		1050	0,10	0,12	0,13
		1400	0,18	0,20	0,19
	4	700	0,02	0,03	0,02
		1050	0,04	0,04	0,07
		1400	0,06	0,09	0,06
20	2	700	0,12	0,13	0,14
		1050	0,32	0,31	0,29
		1400	0,48	0,5	0,88
	3	700	0,05	0,06	0,04
		1050	0,09	0,08	0,08
		1400	0,11	0,12	0,14
	4	700	0,04	0,02	0,02
		1050	0,02	0,05	0,04
		1400	0,05	0,05	0,05

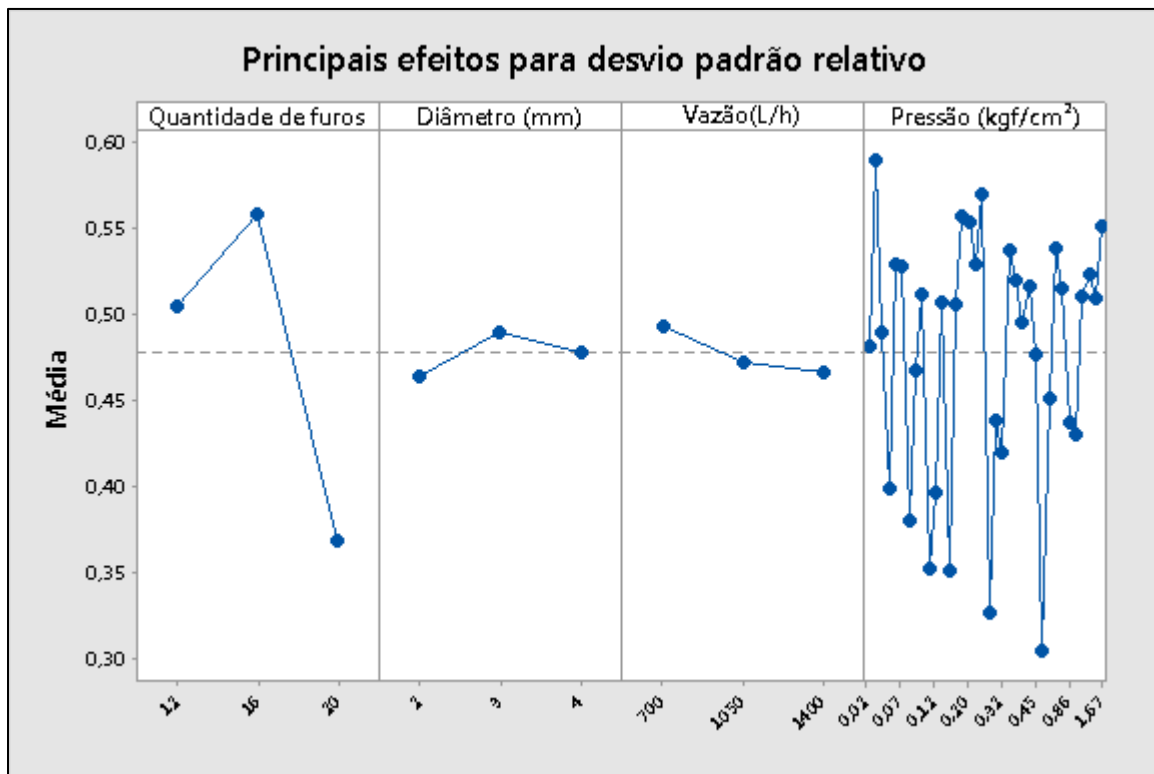


Figura 22 – Principais efeitos para o desvio padrão relativo.

Com esses resultados, verifica-se que a maior influência na qualidade de distribuição de líquido é gerada com a variação do número de furos. Quanto maior a quantidade de orifícios, melhor a uniformidade de dispersão.

Na Figura 23 as variáveis foram combinadas em pares, de forma a verificar o efeito da interação entre:

- A quantidade de furos e o diâmetro;
- A quantidade de furos e a vazão;
- A quantidade de furos e a pressão;
- O diâmetro e a vazão;
- O diâmetro e a pressão;
- A vazão e a pressão

Esses efeitos combinados também são mostrados nos gráficos tridimensionais nas Figuras 24, 25 e 26.

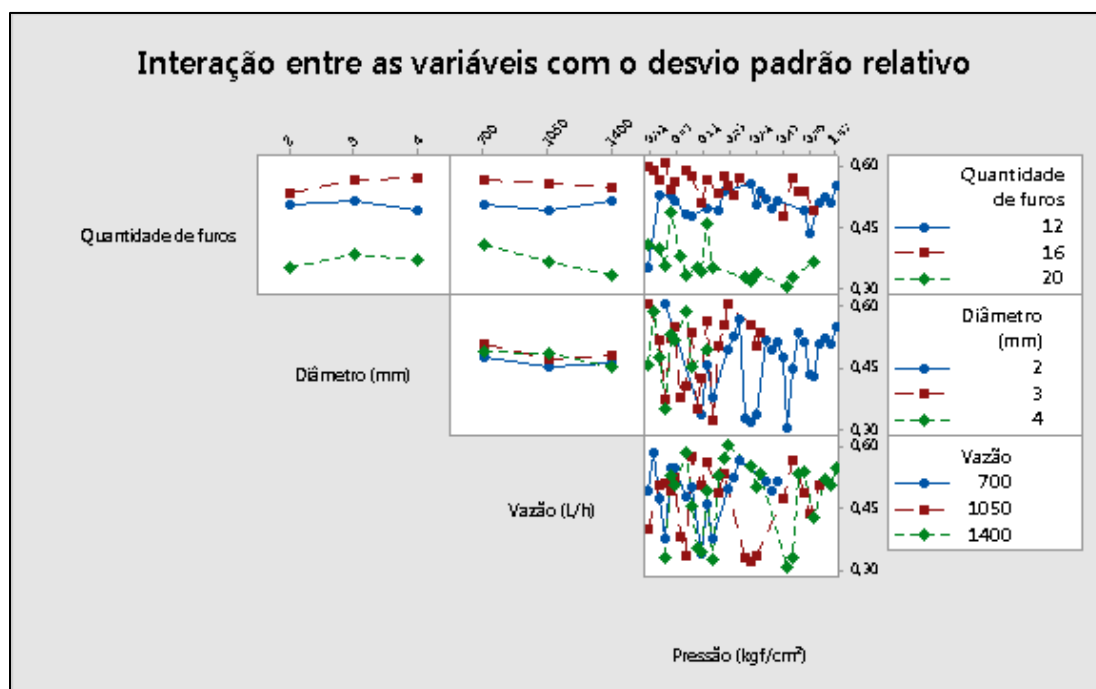


Figura 23 – Efeito da interação entre as variáveis no desvio padrão relativo.

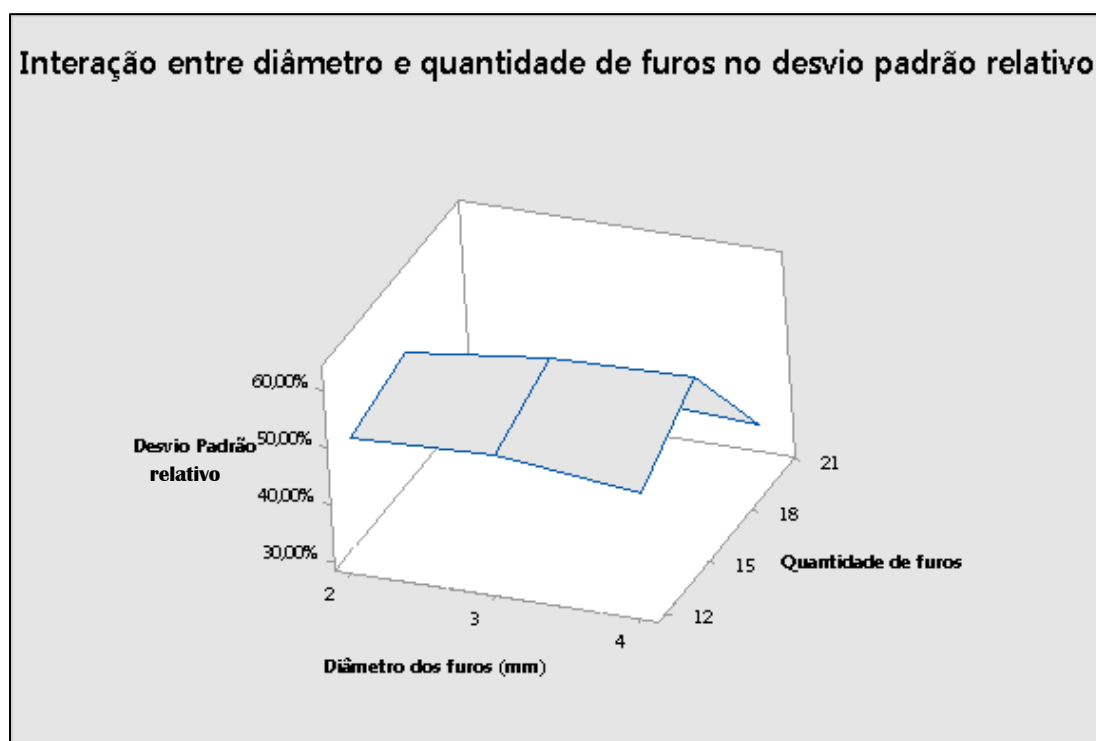


Figura 24 – Efeito do diâmetro e quantidade de furos no desvio padrão relativo.

Interação entre quantidade de furos e vazão no desvio padrão relativo

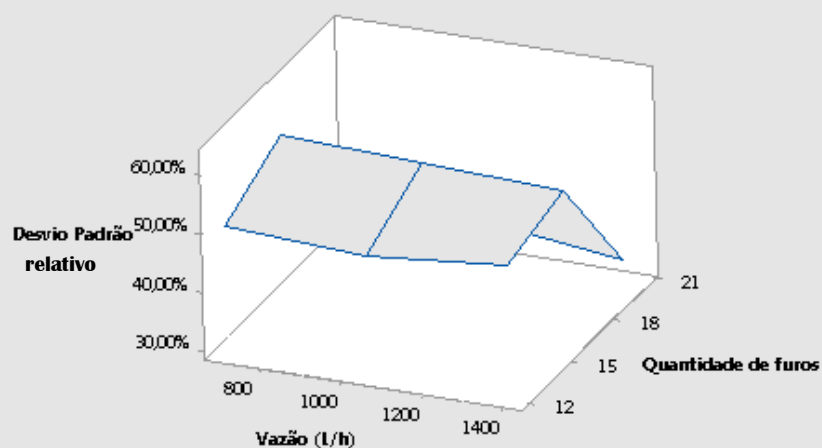


Figura 25 – Efeito da quantidade de furos e da vazão no desvio padrão relativo.

Interação entre vazão e diâmetro dos furos no desvio padrão relativo

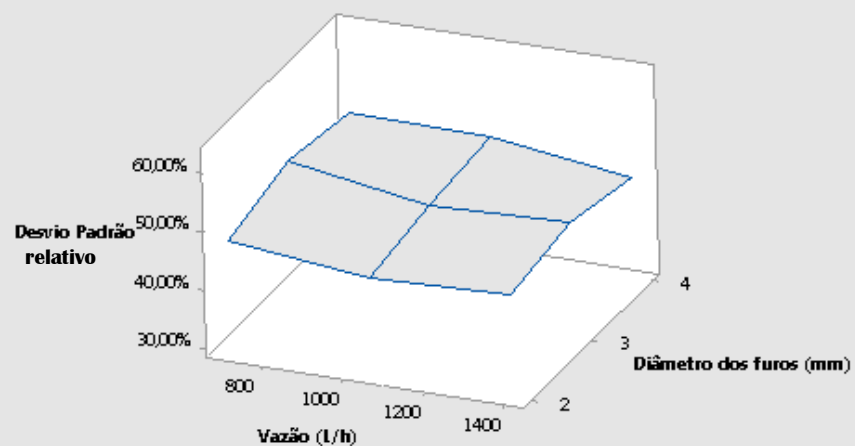


Figura 26 – Efeito do diâmetro dos furos e da vazão no desvio padrão relativo.

Através da análise das interações observa-se novamente que o número de furos foi o fator mais significativo na uniformidade de distribuição.

Com esses resultados foi proposto o seguinte modelo matemático não linear:

$$S = k \cdot N^{\alpha} \cdot d^{\beta} \cdot Q^{\gamma} \quad (3)$$

Em que:

S é o desvio padrão em g;

N é o número de furos;

D é o diâmetro dos orifícios em mm;

Q é a vazão volumétrica em L/h;

k, α , β e γ são os coeficientes do modelo.

O modelo proposto foi calculado através de regressão não linear no programa estatístico Minitab, e encontraram-se os coeficientes apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Estimativa dos coeficientes do modelo matemático.

Parâmetro	Valor Estimado	Erro da estimativa	Intervalo de confiança (95%)
k	2,59302	1,54059	(0,795232; 8,16320)
α	-0,49801	0,09083	(-0,672209; -0,32490)
β	0,06115	0,06702	(-0,071595; 0,19520)
γ	0,85044	0,07608	(0,701269; 1,00508)

Na Tabela 11 verifica-se a análise de variância (ANOVA) dos parâmetros encontrados na qual foi obtida um coeficiente de determinação (R^2) de 0,74. Na Figura 27 observam-se os gráficos residuais para o modelo sendo que o gráfico de probabilidade normal e o histograma indicaram a normalidade do modelo, e o gráfico de residual pela ordem de observação, mostraram os valores sob controle, validando o modelo proposto.

Tabela 11 – ANOVA da regressão não linear.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média quadrática	R ²
Total	77	163163	2119	
Regressão	23	120552	5241,4	0,74
Erro da regressão	54	42610	789,08	

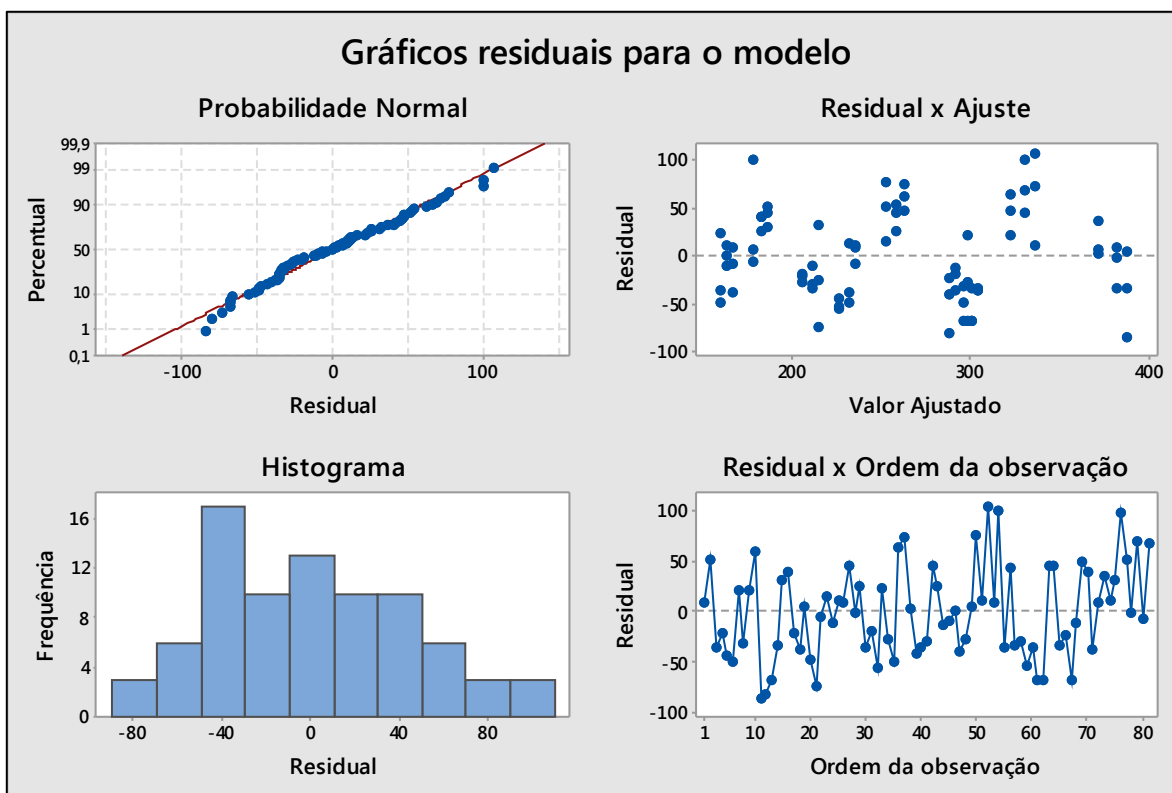


Figura 27 – Gráficos residuais para o modelo não linear.

A média da massa de água introduzida nos 21 tubos, durante os 40 segundos de introdução, pode ser calculada pela equação 4.

$$\bar{m} = \frac{Q \cdot \frac{1000 \text{ g}}{\text{L}} \cdot 40 \text{ s}}{\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot 21} = \frac{Q}{1,89} \quad (4)$$

Em que:

$\bar{m}$ é a média das massas coletadas em g;

Q é a vazão volumétrica em L/h.

Combinando as equações 2, 3 e 4, e considerando a validação estatística dos coeficientes do modelo proposto, tem-se a equação 5

$$RSD = \frac{2,59302 \cdot N^{-0,49801} \cdot d^{0,06115} \cdot Q^{0,85044}}{(Q/1,89)} \quad (5)$$

que pode ser avaliada quanto à uniformidade de distribuição conforme a equação 6.

$$U = 1 - \frac{2,59302 \cdot N^{-0,49801} \cdot d^{0,06115} \cdot Q^{0,85044}}{(Q/1,89)} \quad (6)$$

Em que:

U é o percentual de uniformidade de distribuição;

N é o número de furos;

d é o diâmetro dos orifícios em mm;

Q é a vazão volumétrica em L/h.

Aplicando a equação da uniformidade de distribuição nas mesmas condições experimentais obtêm-se os dados apresentados Tabela 12.

Tabela 12 – Uniformidade de distribuição calculada com modelo não linear.

N	d (mm)	Q (L/h)	RSD (%)	U (%)
12	2	700	55,7	44,3
		1050	52,4	47,6
		1400	50,2	49,8
	3	700	57,1	42,9
		1050	53,7	46,3
		1400	51,5	48,5
	4	700	58,1	41,9
		1050	54,7	45,3
		1400	52,4	47,6
16	2	700	48,3	51,7
		1050	45,4	54,6
		1400	43,5	56,5
	3	700	49,5	50,5
		1050	46,6	53,4
		1400	44,6	55,4
	4	700	50,3	49,7
		1050	47,4	52,6
		1400	45,4	54,6
20	2	700	43,2	56,8
		1050	40,6	59,4
		1400	38,9	61,1
	3	700	44,3	55,7
		1050	41,7	58,3
		1400	39,9	60,1
	4	700	45,0	55,0
		1050	42,4	57,6
		1400	40,6	59,4

As Figuras 28, 29 e 30 representam a uniformidade de distribuição calculada pela equação 6 em função do número de furos e diâmetro dos orifícios para cada valor de vazão selecionado no experimento. É possível verificar que o aumento do número de orifícios é fator fundamental na evolução da qualidade de dispersão.

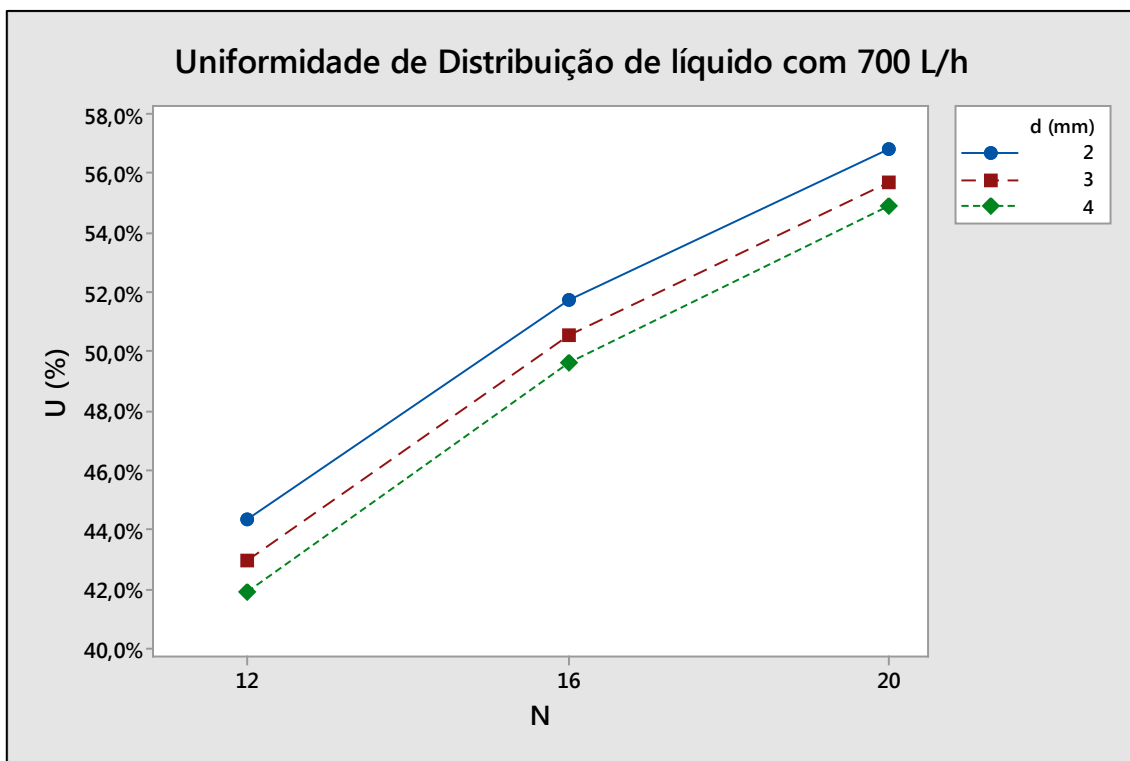


Figura 28 – Uniformidade de distribuição com vazão de 700 L/h.

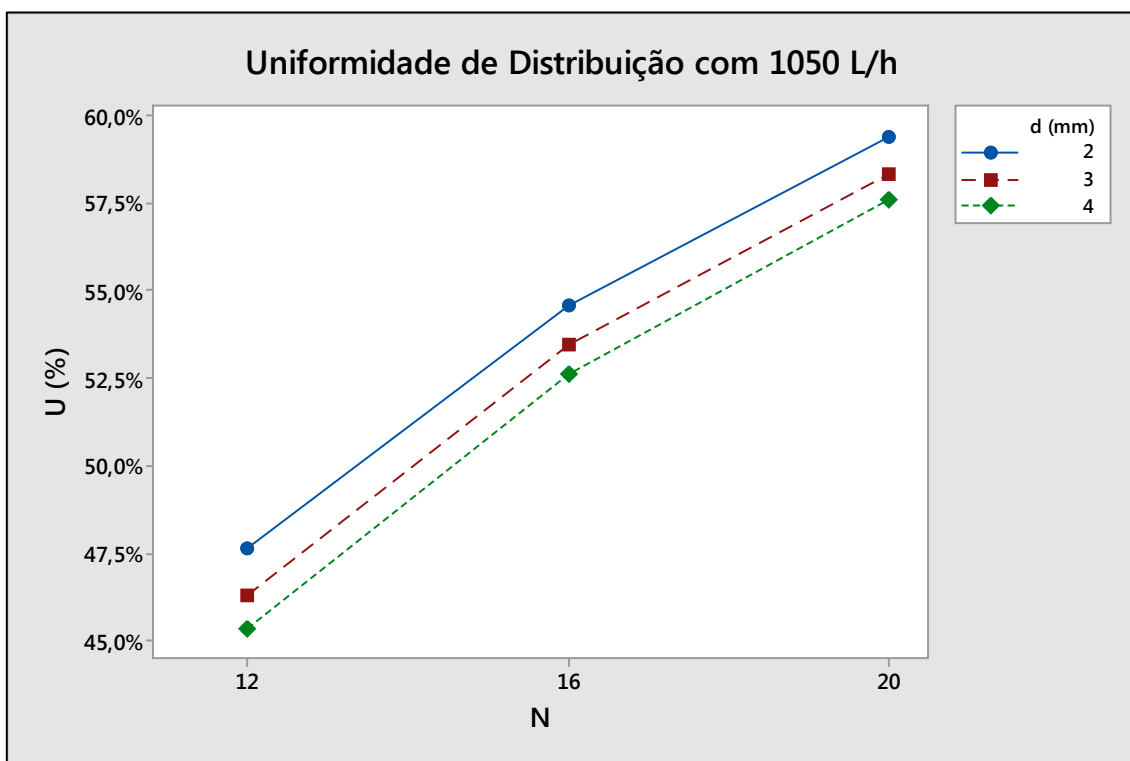


Figura 29 – Uniformidade de distribuição com vazão de 1050 L/h.

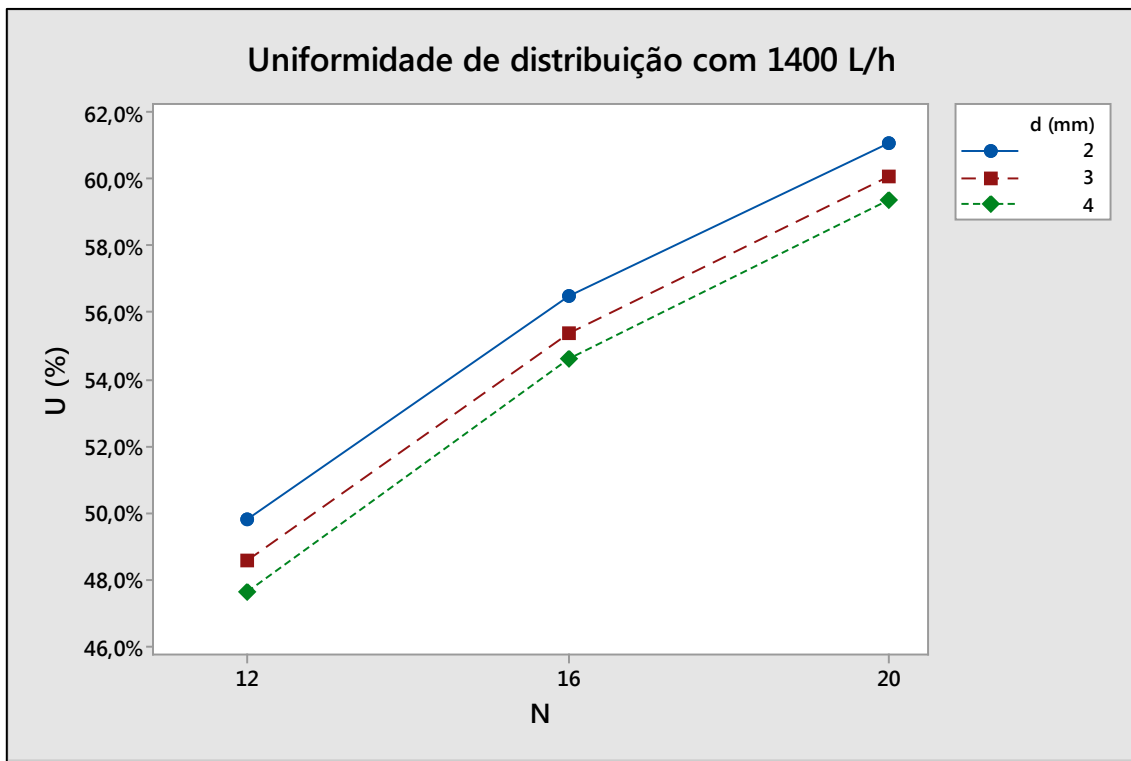


Figura 30 – Uniformidade de distribuição com vazão de 1400 L/h.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Através do presente estudo foi possível concluir que o método utilizado foi capaz de avaliar a uniformidade de dispersão do líquido na saída dos diversos distribuidores testados.

Obteve-se a pior condição de dispersão com o distribuidor com 16 furos, 4 mm de diâmetro nos orifícios e 700 L/h de vazão de líquido, e a melhor condição de dispersão com o distribuidor com 20 furos, 2 mm de diâmetro nos orifícios e 1050 L/h de vazão.

Foi observado em gráficos de superfície que nos casos de pior distribuição, o centro da coluna que recebe a menor quantidade de líquido.

O aparato experimental desenvolvido permitiu avaliar a influência da vazão, do diâmetro dos orifícios e número de furos quanto à pressão e à uniformidade de distribuição do líquido. A pressão se comportou de forma aleatória, porém as demais variáveis tiveram influência na uniformidade de distribuição, sendo o número de furos o parâmetro de maior relevância na dispersão.

Com os dados dos ensaios, definiu-se um modelo não linear validado estatisticamente capaz de determinar a uniformidade de distribuição.

Sugere-se a continuidade do experimento, repetindo os ensaios, para com uma maior quantidade de dados, permitir o aumento do coeficiente de determinação do modelo proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIAG, **Measure Systems Analysis**. Disponível em: http://www.rubymetrology.com/add_help_doc/MSA_Reference_Manual_4th_Edition.pdf Acesso em 29 nov 2016.

AMACS, **Tower Internals** Disponível em: www.amacs.com/fractionation-tower-internals/distributors Acesso em 10 nov 2016.

BEGG COUSLAND, **Pipe and Trough type Distributors for effective acid distribution in the tower packing**. Disponível em: <http://beggcousland.co.uk/products/process-equipment/sulphuric-acid-distributors> Acesso em: 18 nov 2016.

BOZZANO, G., DENTE, M., MANENTI, F. **Fluid Distribution in Packed Beds. Part 2. Experimental and Phenomenological Assessment of Distributor and Packing Interactions**. Industrial & Engineering Chemistry Research, Volume 53, pp. 3165-3183, 2014.

CALDAS, J. N., LACERDA, A. I., VELOSO, E. **Internos de Torres, Pratos & Recheios**. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2003

CARVALHO, J. S., MOURA, L. F. **Método de McCabe-Thiele Reverso para simulação de unidade de destilação multicomponente**. Trabalho apresentado no VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Uberlândia, 2009

CHEN, G. K. **Packed column internals**. Chemical Engineering, pp. 40-51, 1984

DHABALIA, D., PILLING, M. **A new main fractionator designed to separate a range of feed streams incorporates multiple layers of structured packing and a slurry section**. Digital Refining, 2006

FRANK, O., **Packed towers**. Chemical Engineering, pp. 124, 1977

FUROEXPRESS, **Chapas Perfuradas**. Disponível em: www.furoexpress.com/linha-de-chapas-perfuradas Acesso em 10 nov 2016.

GEA, **Tecnologia de Destilação: Colunas de bandeja e empacotamento**, disponível em <http://www.gea.com/pt/products/tray-and-packing-columns.jsp> Acesso em : 18 nov 2016.

HEGGEMANN, M., HIRSCHBERG, S., SPIEGEL, L., BACHMANN, C. **CFD Simulation and Experimental Validation of Fluid Flow in Liquid Distributors**. Chemical Engineering Research and Design, Volume 85, pp. 59-64, 2007

- HOBLE, T. **Mass Transfer and Absorbers**. 1^a ed. Pergamon Press, 1966
- KOCH-GLITSCH **Packed Tower Systems combine INTALOX. Bulletin KGMTIG-1**. Rev. 3-2010 Disponível em: <http://www.koch-glitsch.com/Document%20Library/KGMTIG.pdf> Acesso em 10 nov 2016.
- KOLEV, N. **Packed Bed Columns - For Absorption, Desorption, Rectification and Direct Heat Transfer**. Editora Elsevier, pp. 500-519, 2006
- LIU, H., LI, P., LEW, J. V., ROBLES, D. J. **Experimental study of the flow distribution uniformity in flow distributors having novel flow channel bifurcation structures**. Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 37, pp. 142-153, 2011
- LUDWIG, E. **Applied process design for chemical and petrochemical plants**. 2^a ed. s.l.:Gulf publishing company, 1993.
- MORAES, M. S. **Técnica Experimental para quantificar a eficiência de distribuidores de líquidos industriais do tipo tubos perfurados paralelos**, Dissertação, Engenharia de Minas e Petróleo, USP, 2008
- MORAES, M. S., MORAES Jr., D., LIA, L. R. B., LIMA, J. R. B., PIZZO, S. M. **Experimento para quantificar a eficiência de aspersão de líquidos: aplicação em distribuidores espinha de peixe**. Escola de Minas, Ouro Preto, Volume 61, pp. 25-28, 2008
- PERRY, R. H., GREEN, D. W., MALONEY, J. O. **Perry's Chemical Engineer's Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1999
- SCHUTTE & KOERTING **Bulletin 7-S - Gas Scrubbers**. © Copyright Schutte & Koerting, 2007 Disponível em: http://www.s-k.com/pdf/7S_EjectorVenturiScrub.pdf Acesso em 10 nov 2016.
- SERMAT, **Internos de colunas de processos** Disponível em: www.sermat.com.br/produtos/internos-colunas-de-processos Acesso em 10 nov 2016.
- SILVEY, F. C., KELLER, G. J. **Proceeding of the international symposium on distillation**. 4 ed. s.l.:Brighton, 1969
- SPRAYING SYSTEMS, **Spray Nozzles** Disponível em: www.spray.com.br/spray_nozzles/standard_spray_nozzles.aspx Acesso em 10 nov 2016.

VEER, K. J. R., KLOOSTER, H. W., BRINKENBURG, A. A. H. **The influence of the initial liquid distribution on the efficiency of a packed column.** Chemical Engineering Science, Volume 35, pp. 759-761, 1979

APÊNDICE A

A Tabela 13 apresenta o planejamento aleatório dos ensaios.

Tabela 13 – Planejamento aleatório dos experimentos.

Ensaio	Quantidade Furos	Diâmetro (mm)	Vazão (L/h)
1	12	3	1400
2	16	3	1050
3	12	4	1050
4	12	2	700
5	20	2	1050
6	20	2	700
7	12	3	1050
8	20	3	1400
9	16	2	1400
10	16	4	1050
11	12	4	1400
12	20	2	1400
13	20	4	1400
14	12	3	700
15	16	4	700
16	16	3	700
17	12	2	1050
18	20	4	700
19	12	2	1400
20	20	3	1050
21	12	4	700
22	16	2	700
23	16	2	1050
24	20	3	700
25	16	4	1400
26	20	4	1050
27	16	3	1400

APÊNDICE B

A Tabela 14 apresenta os dados obtidos nos 81 ensaios realizados.

Tabela 14 – Dados experimentais.

Ensaio	Tubo 1 (g)	Tubo 2 (g)	Tubo 3 (g)	Tubo 4 (g)	Tubo 5 (g)	Tubo 6 (g)	Tubo 7 (g)	Tubo 8 (g)	Tubo 9 (g)	Tubo 10 (g)	Tubo 11 (g)
1	1072,5	372,5	967,5	1160	760	200	1132,5	932,5	942,5	897,5	85
2	700	272,5	532,5	890	1042,5	92,5	702,5	932,5	772,5	392,5	0
3	940	332,5	772,5	892,5	622,5	170	822,5	712,5	602,5	760	72,5
4	595	260	352,5	540	372,5	2,5	640	462,5	332,5	352,5	52,5
5	562,5	772,5	420	680	812,5	485	862,5	622,5	680	402,5	137,5
6	350	472,5	252,5	452,5	510	252,5	532,5	360	432,5	232,5	100
7	960	322,5	952,5	962,5	472,5	240	1022,5	712,5	830	702,5	42,5
8	852,5	992,5	802,5	932,5	1052,5	652,5	1152,5	1062,5	752,5	442,5	132,5
9	892,5	232,5	742,5	1082,5	1062,5	82,5	1152,5	712,5	932,5	682,5	92,5
10	797,5	172,5	772,5	1042,5	972,5	92,5	1012,5	712,5	712,5	372,5	72,5
11	1017,5	332,5	1072,5	1012,5	952,5	222,5	922,5	642,5	712,5	672,5	92,5
12	732,5	872,5	707,5	1012,5	832,5	862,5	952,5	592,5	632,5	552,5	202,5
13	882,5	942,5	822,5	1172,5	807,5	592,5	1062,5	792,5	832,5	592,5	192,5
14	572,5	172,5	582,5	632,5	392,5	172,5	572,5	342,5	322,5	412,5	32,5
15	452,5	152,5	592,5	732,5	672,5	72,5	532,5	632,5	472,5	312,5	12,5
16	502,5	172,5	402,5	792,5	692,5	132,5	562,5	772,5	522,5	352,5	32,5
17	792,5	202,5	862,5	852,5	572,5	332,5	932,5	602,5	502,5	377,5	82,5
18	442,5	492,5	612,5	542,5	442,5	312,5	552,5	322,5	447,5	292,5	102,5
19	1172,5	282,5	1127,5	1052,5	992,5	232,5	1302,5	862,5	552,5	652,5	107,5
20	622,5	632,5	612,5	772,5	582,5	532,5	952,5	722,5	602,5	362,5	152,5
21	472,5	562,5	352,5	542,5	407,5	362,5	532,5	672,5	502,5	272,5	82,5
22	392,5	132,5	452,5	562,5	602,5	182,5	492,5	642,5	512,5	287,5	72,5
23	652,5	192,5	712,5	892,5	802,5	347,5	1072,5	762,5	732,5	512,5	112,5
24	352,5	452,5	412,5	632,5	332,5	392,5	252,5	452,5	312,5	152,5	52,5
25	532,5	162,5	752,5	912,5	962,5	112,5	452,5	1012,5	662,5	572,5	112,5
26	372,5	802,5	752,5	912,5	612,5	472,5	282,5	612,5	682,5	312,5	92,5
27	542,5	132,5	592,5	1032,5	992,5	72,5	352,5	1052,5	752,5	622,5	122,5

continua

Tabela 14 – Dados experimentais (Continuação).

Ensaio	Tubo 12 (g)	Tubo 13 (g)	Tubo 14 (g)	Tubo 15 (g)	Tubo 16 (g)	Tubo 17 (g)	Tubo 18 (g)	Tubo 19 (g)	Tubo 20 (g)	Tubo 21 (g)
1	112,5	372,5	847,5	342,5	37,5	1200	1162,5	852,5	640	585
2	392,5	842,5	787,5	420	170	712,5	882,5	312,5	170	295
3	360	680	672,5	372,5	22,5	577,5	712,5	785	257,5	622,5
4	132,5	272,5	412,5	352,5	80	552,5	605	520	252,5	382,5
5	380	422,5	462,5	462,5	340	620	652,5	540	740	352,5
6	232,5	302,5	292,5	280	212,5	312,5	370	342,5	372,5	200
7	160	502,5	530	410	22,5	902,5	972,5	750	372,5	662,5
8	362,5	632,5	992,5	642,5	412,5	722,5	992,5	712,5	912,5	592,5
9	592,5	652,5	932,5	392,5	52,5	912,5	842,5	492,5	262,5	552,5
10	612,5	642,5	972,5	362,5	42,5	672,5	712,5	652,5	132,5	522,5
11	632,5	647,5	752,5	372,5	232,5	1037,5	957,5	792,5	322,5	612,5
12	592,5	512,5	737,5	402,5	462,5	892,5	652,5	712,5	937,5	462,5
13	422,5	712,5	732,5	452,5	452,5	702,5	652,5	772,5	892,5	452,5
14	192,5	312,5	372,5	332,5	32,5	432,5	522,5	492,5	142,5	412,5
15	342,5	422,5	602,5	272,5	12,5	432,5	482,5	432,5	82,5	342,5
16	402,5	482,5	552,5	242,5	12,5	422,5	532,5	322,5	112,5	392,5
17	172,5	477,5	602,5	432,5	122,5	952,5	752,5	742,5	272,5	522,5
18	272,5	342,5	362,5	202,5	212,5	372,5	462,5	452,5	512,5	312,5
19	272,5	622,5	912,5	562,5	132,5	1162,5	992,5	1022,5	372,5	782,5
20	352,5	462,5	592,5	272,5	462,5	672,5	582,5	602,5	682,5	322,5
21	312,5	332,5	392,5	212,5	232,5	412,5	492,5	452,5	552,5	272,5
22	332,5	382,5	462,5	227,5	52,5	502,5	262,5	322,5	152,5	282,5
23	542,5	537,5	792,5	312,5	132,5	732,5	732,5	612,5	172,5	447,5
24	252,5	472,5	612,5	472,5	432,5	632,5	592,5	492,5	532,5	332,5
25	632,5	872,5	862,5	1192,5	372,5	752,5	1422,5	1012,5	432,5	782,5
26	372,5	732,5	792,5	712,5	612,5	412,5	1172,5	712,5	792,5	622,5
27	712,5	1092,5	892,5	1272,5	362,5	712,5	1382,5	892,5	332,5	832,5

continua

Tabela 14 – Dados experimentais (Continuação).

Ensaio	Tubo 1 (g)	Tubo 2 (g)	Tubo 3 (g)	Tubo 4 (g)	Tubo 5 (g)	Tubo 6 (g)	Tubo 7 (g)	Tubo 8 (g)	Tubo 9 (g)	Tubo 10 (g)	Tubo 11 (g)
28	892,5	412,5	1122,5	1352,5	1077,5	132,5	1152,5	712,5	572,5	622,5	42,5
29	592,5	187,5	927,5	552,5	977,5	162,5	862,5	832,5	652,5	342,5	47,5
30	732,5	252,5	972,5	897,5	772,5	292,5	807,5	592,5	452,5	272,5	67,5
31	522,5	192,5	652,5	672,5	477,5	177,5	632,5	452,5	332,5	362,5	77,5
32	607,5	652,5	252,5	752,5	742,5	542,5	812,5	632,5	612,5	392,5	202,5
33	382,5	372,5	352,5	577,5	442,5	252,5	512,5	392,5	302,5	222,5	92,5
34	852,5	232,5	852,5	982,5	632,5	252,5	832,5	552,5	462,5	507,5	0,0
35	932,5	712,5	802,5	952,5	907,5	712,5	1142,5	792,5	632,5	387,5	202,5
36	972,5	252,5	892,5	1412,5	1062,5	292,5	1212,5	987,5	972,5	432,5	302,5
37	792,5	212,5	712,5	1302,5	672,5	132,5	1012,5	867,5	772,5	437,5	52,5
38	1407,5	312,5	1312,5	1362,5	972,5	292,5	1072,5	892,5	612,5	792,5	242,5
39	952,5	937,5	792,5	1082,5	967,5	752,5	1312,5	852,5	832,5	362,5	332,5
40	1062,5	992,5	972,5	1172,5	922,5	712,5	1112,5	922,5	882,5	512,5	57,5
41	612,5	212,5	662,5	692,5	472,5	177,5	572,5	492,5	382,5	362,5	162,5
42	492,5	152,5	592,5	692,5	702,5	52,5	552,5	612,5	652,5	352,5	22,5
43	452,5	132,5	542,5	592,5	612,5	132,5	502,5	607,5	492,5	332,5	22,5
44	932,5	192,5	912,5	907,5	672,5	252,5	812,5	692,5	452,5	472,5	187,5
45	392,5	482,5	482,5	467,5	552,5	272,5	532,5	562,5	692,5	252,5	72,5
46	1252,5	272,5	1222,5	1232,5	822,5	352,5	1092,5	872,5	572,5	352,5	192,5
47	692,5	662,5	652,5	717,5	722,5	472,5	822,5	752,5	652,5	352,5	32,5
48	532,5	132,5	712,5	472,5	472,5	142,5	552,5	512,5	312,5	287,5	92,5
49	412,5	112,5	452,5	572,5	612,5	112,5	532,5	532,5	452,5	237,5	92,5
50	480	240	540	550	1060	320	740	840	760	480	50
51	360	380	370	240	600	230	420	530	220	120	60
52	820	180	840	820	1260	340	620	1340	990	650	40
53	560	580	660	580	710	400	600	820	600	380	100
54	660	310	910	780	1620	350	630	1250	920	600	40

continua

Tabela 14 – Dados experimentais (Continuação).

Ensaio	Tubo 12 (g)	Tubo 13 (g)	Tubo 14 (g)	Tubo 15 (g)	Tubo 16 (g)	Tubo 17 (g)	Tubo 18 (g)	Tubo 19 (g)	Tubo 20 (g)	Tubo 21 (g)
28	222,5	682,5	812,5	702,5	92,5	1152,5	1032,5	872,5	412,5	772,5
29	312,5	632,5	827,5	422,5	497,5	747,5	952,5	607,5	172,5	412,5
30	222,5	552,5	552,5	522,5	92,5	682,5	792,5	782,5	277,5	512,5
31	197,5	332,5	372,5	262,5	52,5	632,5	492,5	462,5	202,5	372,5
32	382,5	412,5	612,5	312,5	462,5	612,5	622,5	607,5	652,5	352,5
33	672,5	732,5	472,5	142,5	267,5	332,5	432,5	817,5	397,5	252,5
34	192,5	532,5	552,5	572,5	107,5	827,5	792,5	612,5	292,5	542,5
35	342,5	612,5	1012,5	512,5	532,5	972,5	932,5	732,5	852,5	472,5
36	632,5	612,5	932,5	472,5	92,5	1272,5	972,5	712,5	152,5	467,5
37	452,5	652,5	1072,5	372,5	92,5	642,5	672,5	617,5	152,5	512,5
38	352,5	907,5	942,5	747,5	87,5	882,5	887,5	1057,5	192,5	792,5
39	552,5	647,5	687,5	532,5	912,5	747,5	797,5	442,5	867,5	442,5
40	432,5	882,5	732,5	492,5	622,5	747,5	892,5	702,5	912,5	512,5
41	162,5	362,5	312,5	267,5	62,5	542,5	532,5	432,5	167,5	352,5
42	212,5	592,5	532,5	232,5	12,5	432,5	512,5	442,5	67,5	352,5
43	232,5	492,5	547,5	172,5	12,5	442,5	582,5	232,5	92,5	512,5
44	192,5	492,5	732,5	577,5	92,5	912,5	772,5	732,5	262,5	632,5
45	162,5	482,5	372,5	182,5	192,5	342,6	492,5	372,5	552,5	362,5
46	307,5	652,5	1022,5	532,5	222,5	1122,5	1012,5	932,5	352,5	992,5
47	327,5	492,5	572,5	352,5	652,5	352,5	772,5	452,5	622,5	512,5
48	192,5	332,5	392,5	272,5	52,5	312,5	552,5	552,5	112,5	532,5
49	272,5	372,5	472,5	202,5	42,5	307,5	612,5	372,5	102,5	472,5
50	240	840	560	330	0	520	1320	710	140	680
51	160	400	540	290	440	260	840	360	370	420
52	540	960	900	440	60	800	1710	980	220	1260
53	260	720	520	260	480	460	1270	740	810	650
54	700	860	860	520	20	720	1590	520	120	860

continua

Tabela 14 – Dados experimentais (Continuação).

Ensaio	Tubo 1 (g)	Tubo 2 (g)	Tubo 3 (g)	Tubo 4 (g)	Tubo 5 (g)	Tubo 6 (g)	Tubo 7 (g)	Tubo 8 (g)	Tubo 9 (g)	Tubo 10 (g)	Tubo 11 (g)
55	1092,5	192,5	1092,5	1102,5	792,5	352,5	1112,5	727,5	712,5	572,5	67,5
56	652,5	132,5	332,5	1052,5	812,5	192,5	772,5	712,5	872,5	512,5	52,5
57	872,5	172,5	732,5	827,5	692,5	207,5	762,5	512,5	612,5	482,5	252,5
58	532,5	112,5	552,5	512,5	372,5	152,5	572,5	382,5	382,5	312,5	22,5
59	572,5	602,5	502,5	737,5	612,5	512,5	872,5	527,5	672,5	292,5	152,5
60	372,5	312,5	312,5	452,5	452,5	212,5	552,5	367,5	432,5	192,5	42,5
61	492,5	182,5	722,5	752,5	592,5	192,5	672,5	412,5	512,5	377,5	42,5
62	732,5	912,5	717,5	972,5	842,5	572,5	1072,5	692,5	842,5	542,5	52,5
63	872,5	172,5	882,5	1312,5	972,5	272,5	1292,5	872,5	972,5	532,5	272,5
64	672,5	142,5	682,5	1022,5	752,5	182,5	952,5	632,5	732,5	442,5	32,5
65	1132,5	232,5	1102,5	1172,5	832,5	312,5	1232,5	712,5	712,5	632,5	132,5
66	712,5	852,5	752,5	1012,5	812,5	752,5	1342,5	452,5	872,5	532,5	172,5
67	712,5	932,5	792,5	1092,5	922,5	352,5	1072,5	702,5	892,5	492,5	472,5
68	442,5	202,5	592,5	562,5	552,5	42,5	622,5	342,5	352,5	362,5	2,5
69	372,5	142,5	472,5	732,5	542,5	42,5	652,5	452,5	592,5	232,5	2,5
70	352,5	142,5	472,5	692,5	602,5	52,5	572,5	442,5	602,5	242,5	12,5
71	852,5	272,5	772,5	802,5	592,5	382,5	992,5	552,5	552,5	612,5	332,5
72	572,5	592,5	462,5	672,5	512,5	252,5	572,5	362,5	542,5	232,5	52,5
73	982,5	452,5	1132,5	1192,5	1162,5	102,5	1152,5	672,5	852,5	472,5	62,5
74	582,5	742,5	452,5	932,5	712,5	582,5	1052,5	452,5	722,5	152,5	32,5
75	552,5	132,5	632,5	632,5	532,5	52,5	552,5	382,5	472,5	252,5	62,5
76	452,5	212,5	612,5	892,5	852,5	52,5	812,5	552,5	772,5	312,5	32,5
77	492,5	232,5	632,5	1052,5	952,5	52,5	932,5	542,5	792,5	372,5	72,5
78	372,5	352,5	362,5	592,5	392,5	352,5	522,5	12,5	372,5	152,5	12,5
79	852,5	192,5	852,5	1472,5	1152,5	92,5	1262,5	752,5	1192,5	572,5	72,5
80	572,5	672,5	552,5	832,5	592,5	252,5	752,5	452,5	612,5	352,5	332,5
81	692,5	292,5	752,5	1312,5	1172,5	92,5	1062,5	632,5	972,5	472,5	52,5

continua

Tabela 14 – Dados experimentais (Continuação).

Ensaio	Tubo 12 (g)	Tubo 13 (g)	Tubo 14 (g)	Tubo 15 (g)	Tubo 16 (g)	Tubo 17 (g)	Tubo 18 (g)	Tubo 19 (g)	Tubo 20 (g)	Tubo 21 (g)
55	392,5	652,5	802,5	592,5	122,5	872,5	872,5	1052,5	232,5	1032,5
56	572,5	572,5	892,5	352,5	32,5	572,5	892,5	502,5	132,5	652,5
57	282,5	512,5	932,5	502,5	52,5	512,5	832,5	892,5	212,5	772,5
58	182,5	272,5	432,5	282,5	12,5	372,5	492,5	552,5	172,5	512,5
59	292,5	352,5	632,5	272,5	617,5	512,5	632,5	652,5	602,5	492,5
60	222,5	192,5	522,5	192,5	292,5	312,5	362,5	432,5	372,5	332,5
61	272,5	472,5	792,5	477,5	62,5	472,5	692,5	732,5	732,5	602,5
62	477,5	572,5	972,5	412,5	732,5	612,5	792,5	832,5	792,5	592,5
63	812,5	712,5	1257,5	452,5	112,5	962,5	962,5	922,5	262,5	852,5
64	392,5	592,5	952,5	352,5	32,5	552,5	902,5	752,5	132,5	652,5
65	512,5	712,5	1032,5	482,5	92,5	672,5	892,5	1072,5	352,5	1012,5
66	512,5	352,5	942,5	352,5	772,5	682,5	792,5	872,5	992,5	632,5
67	542,5	692,5	952,5	392,5	412,5	522,5	872,5	1012,5	892,5	732,5
68	212,5	302,5	552,5	292,5	12,5	402,5	492,5	612,5	152,5	532,5
69	372,5	272,5	812,5	252,5	2,5	402,5	502,5	552,5	82,5	492,5
70	292,5	352,5	782,5	232,5	12,5	372,5	522,5	422,5	92,5	422,5
71	372,5	472,5	792,5	442,5	52,5	592,5	792,5	982,5	232,5	802,5
72	272,5	292,5	742,5	272,5	312,5	282,5	392,5	662,5	442,5	472,5
73	292,5	732,5	712,5	1002,5	12,5	1062,5	892,5	1172,5	252,5	1152,5
74	292,5	432,5	892,5	532,5	672,5	692,5	592,5	772,5	542,5	582,5
75	252,5	372,5	682,5	452,5	12,5	352,5	532,5	952,5	112,5	632,5
76	352,5	522,5	752,5	442,5	12,5	572,5	732,5	512,5	132,5	652,5
77	392,5	632,5	812,5	392,5	32,5	532,5	812,5	572,5	172,5	662,5
78	222,5	252,5	712,5	232,5	352,5	352,5	392,5	412,5	432,5	332,5
79	612,5	772,5	952,5	552,5	52,5	792,5	1012,5	782,5	212,5	832,5
80	312,5	512,5	1172,5	372,5	452,5	592,5	832,5	892,5	792,5	712,5
81	572,5	762,5	1352,5	662,5	12,5	952,5	1112,5	612,5	252,5	772,5