

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Trabalho de Conclusão de Curso II



**CARACTERIZAÇÃO QUANTO AO COEFICIENTE DE CONVECÇÃO
INDIVIDUAL DE TRANSPORTE DE MASSA DA FASE LÍQUIDA DE RECHEIO
PARA COLUNAS DE ABSORÇÃO BASEADO NO PROMOTOR DE PELÍCULA**

Elaborador:

Douglas Keiji Minaki

Rodrigo Keiji Namiki

Orientador:

Prof. Dr. Wilson Miguel Salvagnini

São Paulo, 18 de agosto de 2014

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Wilson Miguel Salvagnini pela orientação e pela experiência emprestada a este trabalho.
- Ao Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo uso de suas instalações.
- Aos colegas da graduação pelo companheirismo e incentivo.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo medir experimentalmente o coeficiente de convecção individual de transporte de massa da fase líquida de um novo tipo de elemento de recheio denominado anel de Raschig modificado. Este recheio utiliza o promotor de película, desenvolvido no Laboratório de Separações Térmicas e Mecânicas do Departamento de Engenharia Química da EPUSP. Para se efetuar essas medidas montou-se um aparato experimental, constituído de uma coluna de absorção e medidores de vazão de líquido e gás que possibilitou a medida da taxa de absorção do CO_2 em água.

Desenvolveu-se também uma metodologia apropriada para que esse aparato possibilitasse efetuar a medida com razoável precisão. Utilizando-se uma atmosfera de CO_2 puro dentro da coluna de absorção, mediram-se as taxas de absorção para diferentes vazões de líquido. As mesmas medidas foram feitas para o recheio Pall Ring de mesma bitola obtendo-se valores de k_x maiores para o anel de Raschig modificado, como era esperado por causa da maior área de contato entre as fases proporcionada pelo promotor de película.

ABSTRACT

This work shows the apparatus utilized, the methodology developed and results obtained for measuring the individual coefficient of mass transfer in the liquid phase for absorption of Carbonic gas by water. Evaporators with film promoter have been developed at the LSTM with good results and this technology was utilized to develop a new packing element called modified Raschig ring. The experimental measures were performed utilizing an absorption column with this new packing element. Inside the column a pure atmosphere of Carbonic gas has been done and consequently the only resistance for mass transfer was in the liquid phase. Measures of gas Carbonic absorption rate for several water flow rates have shown a better performance than Pall Rings at same conditions, they have evidenced that the film promoter enhance the interfacial area as it was expected.

ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	
ABSTRACT	
LISTA DE FIGURAS.....	
LISTA DE TABELAS.....	
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 COLUNA DE ABSORÇÃO	2
2.2 ENCHIMENTOS/PRATOS	2
2.3 TIPOS DE RECHEIOS MAIS COMUMENTE UTILIZADOS	4
2.3.1 RECHEIOS RANDÔMICOS.....	4
2.3.2 RECHEIOS ESTRUTURADOS.....	7
2.3.2.1 RECHEIOS ESTRUTURADOS TRADICIONAIS	7
2.3.2.2 RECHEIOS ESTRUTURADOS DE ALTA EFICIÊNCIA	7
2.4 DISTRIBUIDORES DE LÍQUIDO	9
2.5 REDISTRIBUIDORES DE LÍQUIDO.....	12
2.6 SUPORTE	13
2.7 PRINCÍPIOS DE TRANSPORTE DE MASSA.....	14
2.8 EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA.....	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	20
3.2 NOVO RECHEIO	20
3.3 MATERIAIS E INSTRUMENTOS	22
3.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	24
4. RESULTADOS	26
4.1 TAXA DE ABSORÇÃO	26

4.2	CÁLCULO DO $k_x.a$	28
5.	CONCLUSÃO	32
	BIBLIOGRAFIA	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Anel de Raschig da Sulzer	5
Figura 2 - Sela de Berl da Ningbo T.C.I.....	5
Figura 3 - Selas Intalox da da Ningbo T.C.I	6
Figura 4 – Pall Ring da Sulzer	6
Figura 5 - Sela Intalox de Metal (IMTP) da Sulzer.....	7
Figura 6 - Recheio Mellapak da Sulzer.....	8
Figura 7 - Recheio Goodloe da Koch-Glistch	8
Figura 8 - Recheio Neo-Kloss (Chem-Pro, Bulletin HV-510)	9
Figura 9 - Distribuidor tipo vertedor - modelo bandeja da Koch-Glistch.....	10
Figura 10 - Distribuidor tipo vertedor - modelo calha da Koch-Glistch	10
Figura 11 - Distribuidor tipo orifício – “modelo espinha de peixe” da Koch-Glistch	11
Figura 12 – Distribuidor de orifício - modelo panela com "riser" para passagem de gás da Koch-Glistch.....	11
Figura 13 - Distribuidor de orifício com bicos aspersores da Koch-Glistch.....	11
Figura 14 - Redistribuidor tipo panela de orifício da Koch-Glistch.....	12
Figura 15 - Redistribuidor tipo "Rossete". (Ernest E. Ludwig, 1997).....	13
Figura 16 - Redistribuidor tipo vertedor da Koch-Glistch.....	13
Figura 17 - Modelos de suportes ondulados da Koch-Glistch.....	14
Figura 18 - Coluna com altura z , área da seção transversal A e fração molares x_{A1} e x_{A2}	17
Figura 19 - Volume de controle na superfície do recheio onde ocorre a interface líquido-gás	18
Figura 20 - Distribuição do líquido na superfície com e sem os fios de malha	21
Figura 21 - Montagem do recheio anel de Raschig modificado.....	21
Figura 22 - Recheio Anel de Raschig Modificado (esquerda) e Pall Ring (direita)	22
Figura 23 - Esquema simplificado do experimento	22
Figura 24 – Ilustração do experimento realizado.....	23
Gráfico 1 - Taxa de absorção de CO_2 em função da vazão de líquido utilizando anéis de Raschig modificado.....	26

Gráfico 2 - Taxa de absorção de CO ₂ em função da vazão de líquido utilizando o recheio Pall ring.....	27
Gráfico 3 - Comparação da taxa de absorção de CO ₂ entre os dois enchimentos.....	28
Gráfico 4 - k _x .a em função da vazão de líquido para o anel de Raschig modificado.....	30
Gráfico 5 - k _x .a em função da vazão de líquido para o Pall ring.....	31
Gráfico 6 – Comparação dos valores de k _x .a entre os dois recheios. Para maior clareza de comparação, foram colocadas somente as curvas de tendência no gráfico.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxa de absorção de CO ₂ para o anel de Raschig modificado.....	26
Tabela 2- Taxa de absorção de CO ₂ utilizando o recheio Pall ring.	27
Tabela 3 - Valores de k _x .a para o anel de Raschig modificado.....	29
Tabela 4 - Valores de k _x .a para o Pall ring.	30

1. INTRODUÇÃO

Os recheios de colunas para a operação de absorção são largamente empregados na indústria química. A evolução técnica desse tipo de dispositivo de contato foi notoriamente maior do que a evolução dos pratos de colunas por isso é possível encontrar dezenas de tipos de recheios de colunas no mercado. Essa variedade de tipos procura atender a três requisitos básicos: promover uma grande área de contato entre as fases líquidas e gasosas, gerar uma boa turbulência no escoamento de ambas as fases e impor uma baixa perda de carga no escoamento da fase gasosa. Em princípio os recheios estruturados conseguem atender razoavelmente bem estes requisitos, entretanto, como todos os recheios, têm o seu desempenho muito comprometido quando as vazões de líquido são baixas, pois não conseguem fazer com que o líquido molhe adequadamente a superfície do elemento de recheio reduzindo muito a área de troca de massa. Para estender o funcionamento de recheios a baixas vazões de líquido criou-se um novo tipo de recheio, baseado nos conhecimentos adquiridos com o processo de evaporação por película descendente utilizando o promotor de película, desenvolvido no LSTM do Departamento de Engenharia Química da USP. Num trabalho anterior, Taqueda, M. H. e Salvagnini, W. M. mostraram em evaporadores de películas descendentes, que redes metálicas justapostas a superfícies sólidas apresentam um notável efeito de espalhamento de líquidos formando filmes de espessura muito pequenas e estáveis. O filme assim formado permanece em escoamento ligado à rede metálica mantendo uma grande área superficial do líquido mesmo a baixas vazões de líquido.

Neste trabalho, o transporte de massa, avaliado pelo coeficiente convectivo individual da fase líquida do novo recheio será medido experimentalmente devido à dificuldade de projetar novos enchimentos adequadamente por causa da insuficiência dos dados da literatura e pelo fato de que estudos apenas teóricos não apresentam bem os resultados obtidos na prática devido à complexidade do escoamento através do leito (Fair,1965; Billet,1967; Huber e Meier,1975; Mc Donald et alii, 1979; Kuk,1979; Treybal,1980). Neste experimento, será utilizado um novo recheio desenvolvido com base no promotor de película em recheios de colunas de absorção, objetivo deste trabalho de conclusão de curso.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COLUNA DE ABSORÇÃO

A coluna de absorção é uma operação unitária utilizada para o controle de poluição, recuperação de produtos gasosos, purificação e concentração de misturas. Nas indústrias, a absorção é utilizada em processos diversos tais como na purificação de gases de combustão, remoção de CO₂ na fabricação de amônia, recuperação de solutos como SO₂, acetona e HCl.

Nesta operação, é provocado um contato direto entre líquido e gás na coluna, fazendo ocorrer a transferência de massa de um componente da mistura gasosa para a fase líquida ou um componente da mistura líquida para a fase gasosa. A absorção é o processo na qual ocorre a separação de componentes de uma mistura gasosa por contato com uma corrente líquida onde esses componentes se dissolvem. O processo inverso a este, na qual o componente dissolvido no líquido é absorvido pela fase gasosa é denominado desabsorção ou stripping (Reynaldo Gomide, 1988).

2.2 ENCHIMENTOS/PRATOS

O processo de absorção depende do contato líquido-vapor. Este contato é proporcionado através de dispositivos, sendo os mais usuais: pratos, recheios estruturados e recheios randômicos.

Os pratos (ou bandejas) possuem em sua superfície dispositivos para passagem de vapor e possuem também vertedores para formar um nível de líquido sobre o prato e assim direcionar o excesso de líquido para o prato abaixo. Com isso, formam-se uma corrente ascendente de vapor e uma descendente de líquido, na qual o vapor atravessa o líquido na superfície do prato promovendo o transporte de massa. Estes pratos são montados de acordo com a função da torre, variando o número de pratos com espaçamento determinado e o tipo de prato (perfurados, valvulados, gradeadas, com borbulhadores) aplicado na coluna.

Os recheios estruturados são feitos sob medida para um determinado diâmetro e são formados por estruturas de chapas (metálicas ou não-metálicas) corrugadas e perfuradas, encaixadas paralelamente umas às outras em diferentes geometrias.

Os recheios randômicos possuem forma geométrica bem definida, sendo simples ou complexo (brita, anéis lisos ou recortados, selas, etc.), sendo colocados aleatoriamente na coluna até que a seção esteja cheia.

As diferenças entre os recheios estruturados e os randômicos seriam que enquanto os recheios randômicos são, em geral, menos caros em termos de investimento de capital, os recheios estruturados fornecem uma baixa queda de pressão, aliada a uma alta eficiência de transferência de massa, reduzindo, portanto, os custos operacionais (McGLAMERY, 1988).

As diferenças entre colunas com recheio e com bandejas seriam que as colunas com recheios apresentam maiores áreas de transferência de massa, pois ao contrário dos pratos, os recheios promovem o contato líquido-vapor em toda a coluna e não apenas na área ativa do prato. Também, o prato tem uma área aberta de 8-15 % da área da seção reta da torre, enquanto para um projeto típico de torres recheadas essa relação é de 50 % (CHEN, 1984).

Vários autores (Caldas, Billet, etc.) apontam que um dos maiores problemas dos recheios é sua capacidade de promover um bom recobrimento da superfície sólida do recheio pelo líquido, esta característica é chamada de molhabilidade. Uma boa molhabilidade do elemento de recheio só é possível quando a vazão de líquido é razoavelmente elevada. O próprio caudal de líquido favorece um espalhamento do líquido sobre a superfície sólida. O recobrimento deficiente da superfície sólida do recheio acarreta uma perda significativa de eficiência do transporte de massa nas operações de absorção que empregam o recheio como dispositivo de contato.

Encontra-se na literatura recomendações de vazões mínimas de líquido para obter uma boa eficiência de troca de massa. Esta limitação própria dos enchimentos randômicos exige que as operações destes equipamentos trabalhem sempre com altas vazões de líquido onerando o custo operacional.

Outra característica própria dos recheios randômicos é a tendência que esses elementos têm de induzirem um escoamento radial isto é, fazer com que o líquido escoe pelas paredes da torre de recheio (Caldas, 2003), efeito este que reduz sensivelmente a eficiência na troca de massa.

Com o intuito de reduzir a queda de pressão e aumentar o rendimento do processo nas torres de absorção, as refinarias têm substituído as seções de bandejas por leitos recheados devido ao desenvolvimento da tecnologia dos recheios.

Pode-se citar como boas características em um recheio:

- Apresentar grande superfície de interface entre líquido e vapor
- Ser quimicamente inerte para os fluidos processados
- Possuir boa resistência mecânica
- Baixo custo

2.3 TIPOS DE RECHEIOS MAIS COMUMENTE UTILIZADOS

2.3.1 RECHEIOS RANDÔMICOS

No passado, eram utilizados pedaços irregulares de rochas e principalmente de coque como enchimentos de colunas. O coque foi muito utilizado devido ao seu baixo custo e à sua inércia química, mas devido à sua tendência de formar canais preferenciais e por sofrer gradual desintegração, seu uso foi sendo alterado por novos enchimentos (Leva, 1953, 1954).

A partir de então, iniciou-se a fabricação de enchimentos de material cerâmico, porcelana, vidro, plástico e metal. Surgindo assim, enchimentos de formas regulares, que são inseridas aleatoriamente ou ordenadamente na coluna, visando aumentar a área superficial por unidade de altura e reduzir a perda de carga no leito, podendo ser utilizado em um processo de separação comum ou específico.

Dentre os recheios de formas regulares, os mais importantes são:

- 1) Anéis de Raschig: foi o primeiro recheio a ser utilizado, por volta de 1907 (Eckert, 1979). Comumente disponível em cerâmica e metal, mas também pode estar disponível em plástico. Apesar do seu baixo custo, apresenta alta perda de carga e pequena área superficial, reduzindo assim, a sua eficiência. Desse modo, devido ao surgimento de outros recheios mais eficientes, praticamente caiu em desuso.



Figura 1 - Anel de Raschig da Sulzer

- 2) Selas de Berl: é o segundo recheio mais antigo, foi desenvolvido com o objetivo de tornar o leito mais desordenado e reduzir a disposição ordenada existentes nos anéis de Raschig. Uma desvantagem existente na sela de Berl é a sua forma, que permite o encaixe uma sobre a outra, formando peças superpostas, ficando assim, menos eficiente (Leva, 1953). E assim como os anéis de Raschig, vêm gradualmente desaparecendo nos últimos anos.



Figura 2 - Sela de Berl da Ningbo T.C.I

- 3) Selas Intalox: considerado uma nova versão da sela de Berl. Devido a sua forma, são mais fáceis de serem produzidas em cerâmica e plástico, portanto, mais vantajosas economicamente. Possuem o mesmo problema das selas de Berl, na qual a sua forma permite a formação de peças superpostas.



Figura 3 - Selas Intalox da da Ningbo T.C.I

- 4) Pall Ring: representa o maior melhoramento feito nos anéis de Raschig, sendo o recheio mais usado em destilação. Inventado em 1950, quando o Dr. Pfanmueller buscava melhorar o desempenho dos anéis de Raschig, por não possuir o interior ativo – o que comprometia a transferência de massa a pressões baixas – e também por sua grande superfície de contato entre os recheios, fato que comprometia a área interfacial. Por isso, foram introduzidas janelas nos lados no anel. Surgiu desse modo, um recheio de alta eficiência com grande flexibilidade e grande capacidade (CALDAS E LACERDA, 1988).



Figura 4 – Pall Ring da Sulzer

- 5) Sela Intalox de Metal (IMTP): recheio desenvolvido em meados de 1976, apresentando baixa perda de carga e alta eficiência em relação a outros recheios

como Pall ring e selas Intalox (Strigle e Rukovena, 1979; Dolan e Strigle, 1980; Strigle e Perry, 1981).



Figura 5 - Sela Intalox de Metal (IMTP) da Sulzer

2.3.2 RECHEIOS ESTRUTURADOS

Os recheios estruturados são todos aqueles que podem ser colocados na coluna de uma forma ordenada ou arrumada. Podem ser divididos em dois grandes grupos: os tradicionais e os de alta eficiência.

2.3.2.1 Recheios Estruturados Tradicionais

Dentre os que obtiveram maior sucesso encontram-se os anéis de Raschig maiores que 75 mm (3 in) e as grades que podem ser de metal, plástico, cerâmica ou madeira. Devem ser arrumados na coluna de forma organizada, a fim de apresentar um bom desempenho com baixa perda de carga (CALDAS E LACERDA, 1988).

2.3.2.2 Recheios Estruturados de Alta Eficiência

São caracterizados por apresentarem baixíssima perda de carga associada a uma elevada taxa de transferência de massa. Este tipo de recheio é mais caro, entretanto, por ser mais eficiente, o volume de recheio a ser aplicado é menor. Os principais recheios deste tipo são:

- 1) Koch-Sulzer: formado por arames finos que formam um tecido metálico com tiras, que são paralelas e corrugadas, sendo montadas em camadas circulares de mesmo diâmetro que o casco da coluna, e sucessivas camadas são sobrepostas.



Figura 6 - Recheio Mellapak da Sulzer

- 2) York-Twist, Goodloe e Hyperfil: são recheios formados de conjuntos de telas de arame enrugadas e entrelaçadas. Nos três recheios, a ação capilar gera uma alta relação superfície-volume líquido.

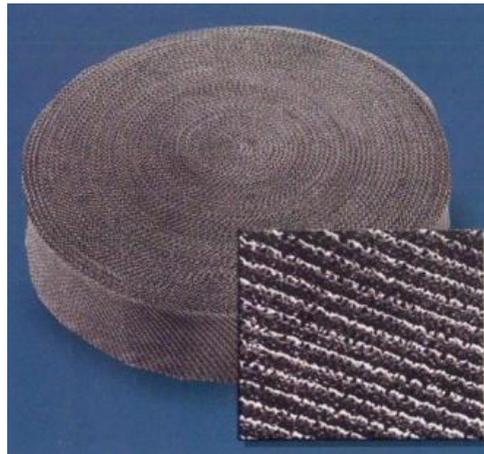


Figura 7 - Recheio Goodloe da Koch-Glitsch

- 3) Neo-Kloss: uma peneira de tela fina é dobrada em espirais para formar um rolo de mesmo diâmetro interno da coluna. A ação capilar dispersa o líquido através das

aberturas da peneira, e o vapor escoar diretamente para cima entre as camadas verticais da peneira molhada.



Figura 8 - Recheio Neo-Kloss (Chem-Pro, Bulletin HV-510)

2.4 DISTRIBUIDORES DE LÍQUIDO

Nas colunas de enchimento, para ajudar a aumentar o desempenho e eficiência do transporte de massa, é utilizado um distribuidor de corrente líquida no topo da coluna. O distribuidor tende a diminuir a canalização na medida em que faz com que o líquido seja distribuído uniformemente no topo da coluna na forma de películas finas sobre toda a superfície do enchimento. Ao longo da coluna, estas películas tendem a se juntar e se tornar mais espessas em umas regiões e mais finas em outras, formando regiões de passagem preferenciais, efeito este, conhecido como canalização (Baker et alii, 1935; Manning e Cannon, 1957; Richardson, 1961; Mc Cabe e Smith, 1975; Gunn, 1978; Farid e Gunn, 1978). A canalização deve ser evitada na medida em que faz com que a superfície dos enchimentos fique irregularmente molhada diminuindo o contato líquido-gás e assim, diminuindo também a eficiência do transporte de massa (Manning e Cannon, 1957; Huber e Hiltbrunner, 1966; Meier e Huber, 1969).

As características que tornam um distribuidor ideal seriam as seguintes (Koch-Glitsch, catálogo Koch-Glitsch):

- distribuir uniformemente o líquido,
- resistência à obstrução ou entupimento,

- amplo range de operação,
- baixa queda de pressão para a fase vapor,
- menor largura possível,
- possuir estrutura firme com vida longa sem haver flacidez.

Dentre os modelos comerciais de distribuidores de líquido, são cinco os principais modelos:

- Distribuidores do tipo vertedor de bandeja



Figura 9 - Distribuidor tipo vertedor - modelo bandeja da Koch-Glitsch

- Distribuidores do tipo vertedor de calha

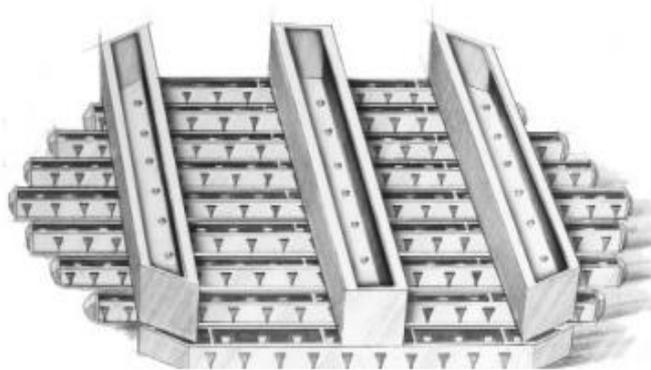


Figura 10 - Distribuidor tipo vertedor - modelo calha da Koch-Glitsch

- Distribuidores com tubos perfurados paralelos



Figura 11 - Distribuidor tipo orifício – “modelo espinha de peixe” da Koch-Glistch

- Distribuidores de orifício tipo panela

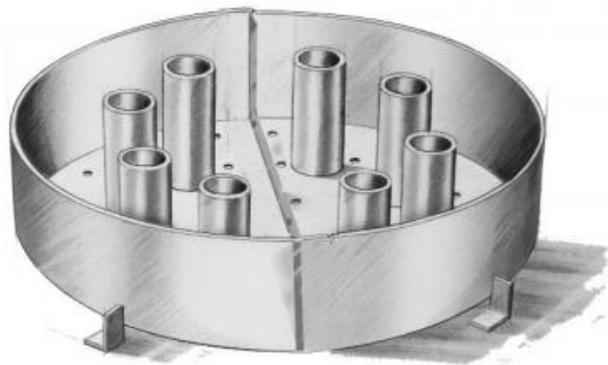


Figura 12 – Distribuidor de orifício - modelo panela com "riser" para passagem de gás da Koch-Glistch

- Distribuidores com bicos aspersores

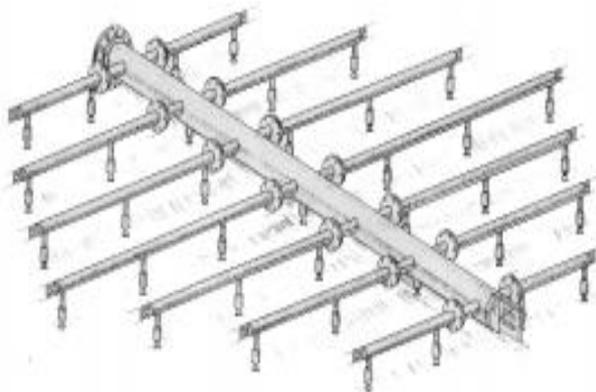


Figura 13 - Distribuidor de orifício com bicos aspersores da Koch-Glistch

2.5 REDISTRIBUIDORES DE LÍQUIDO

Ao longo da coluna, o líquido descendente tende a escoar para a parede devido à descontinuidade da superfície do enchimento e maior área livre em relação a região central. Desse modo, o redistribuidor é utilizado para realizar a distribuição uniforme do líquido que escoar pelo caminho preferencial sobre o enchimento (Eckert, 1979; Zenz, 1979; Perry e Green, 1984).

As razões principais para se utilizar um redistribuidor são (Koch-Glitsch, catálogo Koch-Glitsch):

- Introdução de alimentação,
- Alta contagem de estágios teóricos,
- Misturar o líquido descendente,
- Má distribuição do líquido,
- Peso do leito.

Os tipos de redistribuidores mais comuns são:

- Redistribuidor tipo panela:

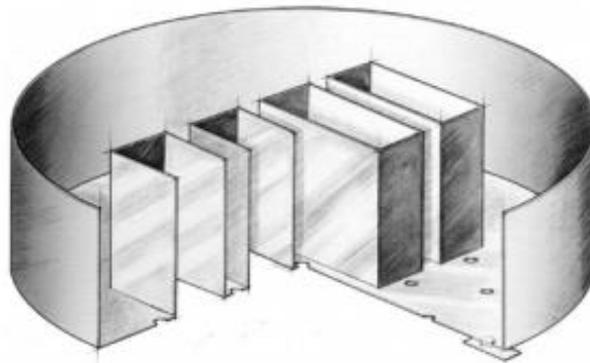


Figura 14 - Redistribuidor tipo panela de orifício da Koch-Glitsch

- Redistribuidor tipo "Rosette":

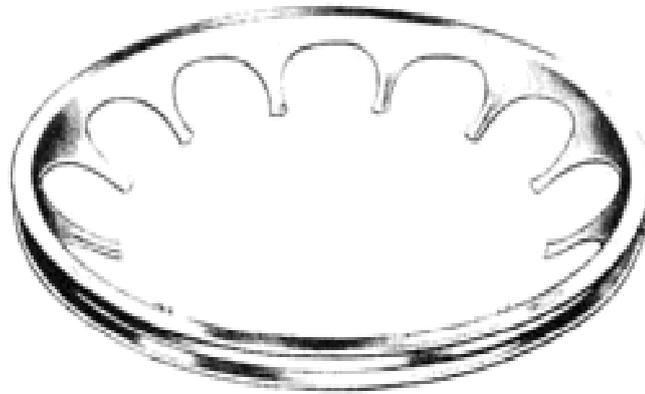


Figura 15 - Redistribuidor tipo "Rosete". (Ernest E. Ludwig, 1997)

- Redistribuidor tipo vertedor



Figura 16 - Redistribuidor tipo vertedor da Koch-Glistch

2.6 SUPORTE

O suporte do enchimento presente no fundo da coluna tem como função além de suportar o enchimento, de distribuir o gás. Esta operação é importante devido ao fato do gás e do líquido passarem em contra-corrente através dos mesmos orifícios, podendo formar uma coluna de líquido sobre o prato e elevar a perda de carga nos casos em que se possui pequena área livre para determinada vazão.

Dentre as principais características que um suporte deve ter são (Koch-Glistch, catálogo Koch-Glistch):

- Ter alta porcentagem de área livre,
- Deve suportar o enchimento nas condições de operação da coluna
- Seu uso não deve ser limitado quanto ao tipo e tamanho do enchimento utilizado, à temperatura de projeto, a profundidade do leito, ao material de construção e deve ter resistência à corrosão.

Existem dois tipos de suportes, os suportes planos com perfurações e suportes ondulados com perfurações. Os suportes planos apresentam pequena área livre, causando elevada perda de carga (Leva, 1957; Eckert, 1979). Já alguns modelos de suportes ondulados apresentam área livre superior a 100% da área da seção transversal da coluna (Eckert, 1979).

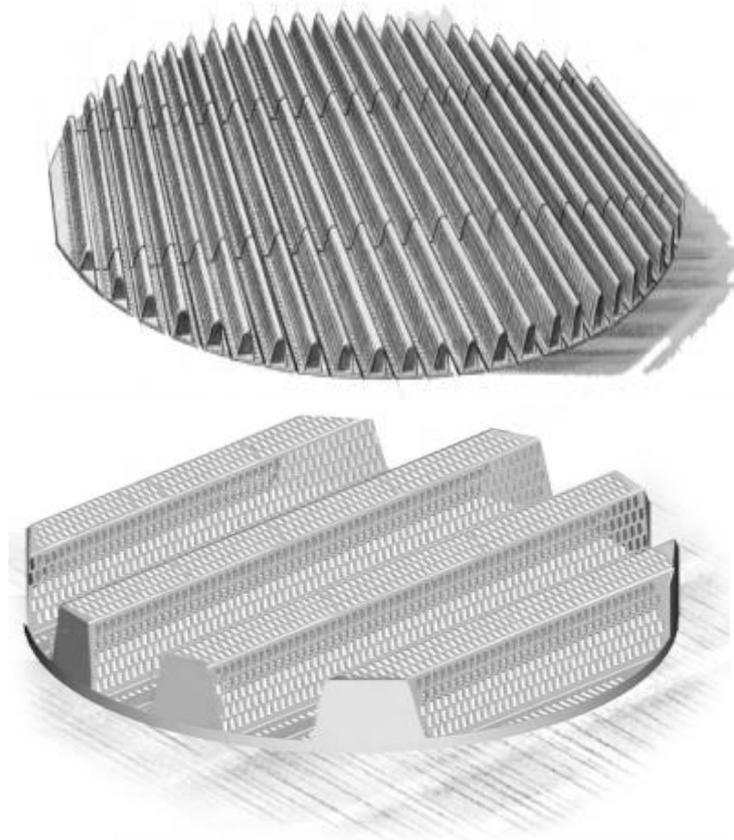


Figura 17 - Modelos de suportes ondulados da Koch-Glistch

2.7 PRINCÍPIOS DE TRANSPORTE DE MASSA

A difusão é o movimento, sob influência de estímulos físicos, de um componente individual através da mistura. A origem mais comum da difusão é o gradiente de

concentração do componente que se difunde. Este gradiente tende a mover as moléculas do componente em uma direção tal que as concentrações se igualem e o gradiente seja anulado. Quando este gradiente é mantido, seja pelo constante suprimento do componente em difusão à região de alta concentração e pela remoção do mesmo na região de baixa concentração, o fluxo do componente é contínuo. Este movimento é explorado nas operações de transferência de massa (CALDAS E LACERDA, 1988).

Na grande maioria dos processos industriais, pode ser considerado um estado estacionário para o processo, onde as condições em qualquer ponto do equipamento não variam com o tempo. Sendo assim, o fluxo de um componente i , em uma dada direção z pode ser calculado pela integração da seguinte equação (Eq.1):

$$N_i = x_i \cdot \sum N_i - c \cdot D_{mi} \cdot \frac{dx_i}{dz} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

N_i : fluxo do componente i ,

x_i : fração molar do componente i ,

c : concentração total,

D_{mi} : difusividade volumétrica do componente i na mistura,

$x_i \cdot \sum N_i$: fluxo devido ao movimento da fase,

$c \cdot D_{mi} \cdot \frac{dx_i}{dz}$: fluxo devido à difusão na fase.

Considerando-se um sistema binário de componentes A e B, o fluxo de A, por exemplo, na direção z , é dado pela equação Eq.2:

$$N_A = x_A \cdot (N_A + N_B) - c \cdot D_{AB} \cdot \frac{dx_A}{dz} \quad (\text{Eq.2})$$

Integrando-se a equação Eq.2, em condições tais que a concentração total c e a difusividade de A em B (D_{AB}) possam ser considerados constantes, como no caso de gases, obtém-se a seguinte equação, Eq.3:

$$N_A = R_A \cdot \frac{c \cdot D_{AB}}{z_2 - z_1} \cdot \ln \frac{R_A - x_{A2}}{R_A - x_{A1}} \quad (\text{Eq.3})$$

Onde $R_A = \frac{N_A}{N_A + N_B}$, definida como a relação entre o fluxo do componente A e o fluxo total.

Para o caso de difusão unimolecular, na qual um componente sofre difusão através de outro que não sofre transferência de massa (inerte). Neste caso, $N_B=0$ e $R_A=1$, de modo que substituindo na Eq.3 fica da seguinte forma:

$$N_A = \frac{c \cdot D_{AB}}{z_2 - z_1} \cdot \ln \frac{1 - x_{A2}}{1 - x_{A1}} \quad (\text{Eq.4})$$

A maioria das situações práticas envolve o escoamento em regime turbulento, com o mecanismo do movimento dos turbilhões não sendo bem conhecido. Também a descrição matemática do escoamento no interior de um equipamento de transferência de massa, como por exemplo, uma coluna recheada ou de pratos, é extremamente complicada, o que nos impossibilita expressar a transferência de massa em tais sistemas por equações matemáticas simples. Por outro lado, a transferência de massa para o regime laminar é bem conhecida, ao menos para gases, visto que envolve a difusão molecular com modelos matemáticos que fornecem resultados normalmente de acordo com os obtidos experimentalmente (CALDAS E LACERDA, 1988).

Logo, é interessante exprimir a expressão da transferência de massa em qualquer regime de escoamento através de equações semelhantes às utilizadas na transferência de massa em regime laminar. Para isso, o termo $\frac{c \cdot D_{AB}}{z_2 - z_1}$ da Eq.4 é substituído por um coeficiente local de transferência de massa, de modo que teremos:

$$N_A = F \cdot \ln \frac{1 - x_{A2}}{1 - x_{A1}} \quad (\text{Eq.5})$$

Onde F é o coeficiente local de transferência de massa.

Neste caso, para a difusão unimolecular, o fluxo pode ser descrito através da seguinte expressão:

$$\textit{fluxo} = \textit{coeficiente} \times \textit{diferencial}$$

Sendo que este diferencial pode ser expresso de várias maneiras, dando origem a vários tipos de coeficientes para cada situação. No caso da transferência de massa unimolecular, temos:

$$\text{Para gases, } N_A = k_G \cdot (P_{A1} - P_{A2}) = k_y \cdot (y_{A1} - y_{A2}) = k_c \cdot (c_{A1} - c_{A2}) \quad (\text{Eq.6})$$

Para líquidos,
$$N_A = k_x \cdot (x_{A1} - x_{A2}) = k_L \cdot (c_{A1} - c_{A2}) \quad (\text{Eq.7})$$

2.8 EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA

No experimento realizado, o equipamento utilizado foi uma coluna recheada, preenchida com gás carbônico (CO_2) e alimentada com uma vazão de água. O objetivo foi determinar a eficiência do recheio de película no auxílio na absorção do CO_2 pela água.

Para fins de equacionamento, a transferência de massa foi avaliada através do seguinte volume de controle (Figura 19):

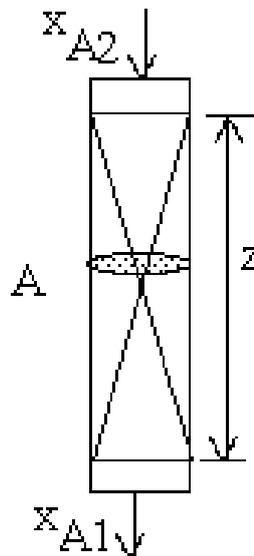


Figura 18 - Coluna com altura z , área da seção transversal A e fração molares x_{A1} e x_{A2}

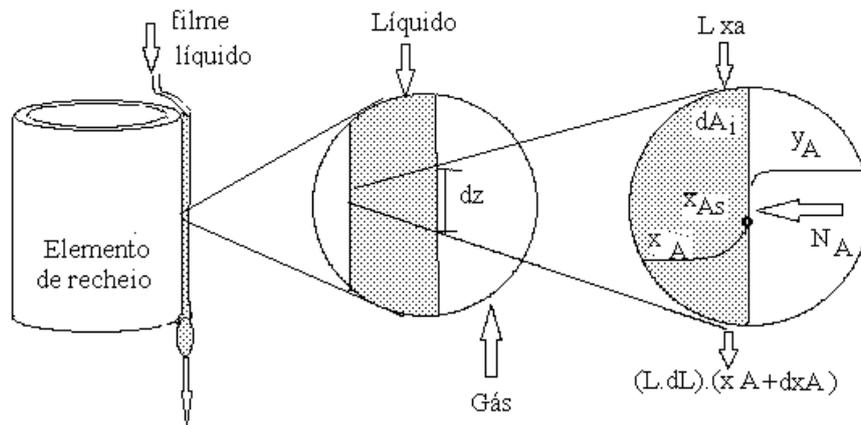


Figura 19 - Volume de controle na superfície do recheio onde ocorre a interface líquido-gás

Considerando dz a variação infinitesimal da altura em qualquer ponto da coluna, a variação da concentração de CO_2 (dx_A) que ocorre tanto na fase líquida quanto na fase gasosa será devido ao transporte de massa entre elas. A partir do balanço de massa no volume de controle mostrado acima temos a seguinte equação:

$$N_A \cdot dA_i + L \cdot x_A = (L + dL) \cdot (x_A + dx_A) \quad (\text{Eq.8})$$

Onde:

N_A : fluxo de massa de CO_2 entre as fases líquida e gasosa

A_i : área interfacial das fases líquida e gasosa

L : fluxo molar de líquido (mol/s)

x_A : fração molar de CO_2 na fase líquida

Como a área interfacial A_i é de difícil determinação devido aos tipos de enchimentos utilizados, a seguinte expressão é utilizada como alternativa:

$$dA_i = a \cdot dV = a \cdot A \cdot dz \quad (\text{Eq.9})$$

Sendo:

dV : Volume da seção com área da seção transversal A e altura dz

a : área superficial de troca

A : área da seção transversal da coluna

O fluxo de massa pode ser representado em função da fase líquida com o auxílio do coeficiente de transferência de massa (k_{xA}) e da fração molar de CO_2 na superfície de contato (x_{AS}) pela Equação 10:

$$N_A = k_{xA} \cdot (x_{AS} - x_A) \quad (\text{Eq. 10})$$

Adotando a hipótese de que a solução está diluída, temos que a variação da vazão de líquido é praticamente inalterada ($dL=0$). Desse modo, utilizando esta hipótese e substituindo-se as Equações 9 e 10 na Equação 8, temos o resultado representado na Equação 11:

$$k_{xA} \cdot a \cdot (x_{AS} - x_A) \cdot dz = L_M \cdot dx_A \quad (\text{Eq. 11})$$

Sendo:

$L_M = L/A$: Densidade de fluxo molar de líquido ($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

Isolando z na Equação 11, temos a seguinte equação:

$$\int_0^z dz = z = \frac{L_M}{k_{xA} \cdot a} \int_1^2 \frac{dx_A}{(x_{AS} - x_A)} \quad (\text{Eq. 12})$$

Integrando a Equação 12 e isolando $k_{xA} \cdot a$, temos:

$$k_{xA} \cdot a = \frac{L_M}{z} \ln \frac{x_{AS} - x_{A2}}{x_{AS} - x_{A1}} \quad (\text{Eq. 13})$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As medidas experimentais serão efetuadas em uma coluna de absorção (escala de laboratório) com os novos recheios fabricados no próprio Departamento de Engenharia Química. Nesta coluna serão medidas as taxas de absorção do CO₂ pela água o que permite o cálculo do coeficiente convectivo de transporte de massa da fase líquida multiplicado pela área interfacial por volume de recheio (a) deste recheio utilizando sistema água e CO₂.

Os resultados serão comparados com um dos recheios tradicionais (Pall Ring) através dos dados obtidos experimentalmente. Espera-se baseado no desempenho de evaporadores com promotor de película que este tipo de recheio tenha um bom desempenho do ponto de vista do transporte de massa para baixas vazões de líquido devido ao fato de o promotor de película proporcionar uma alta capacidade de formar películas de líquido em escoamento mesmo com líquidos de grande tensão superficial, tal como a água em vazões muito baixas. Esta característica não é encontrada nos recheios comerciais a disposição do engenheiro de projeto, com isso espera-se que este recheio venha a preencher na lacuna as condições de operação de recheios.

3.2 NOVO RECHEIO

Os recheios apresentam a dificuldade de promover um eficiente espalhamento do líquido sobre a sua superfície sólida, principalmente quando a tensão superficial do líquido for alta como acontece com a água. Este fato impõe que a vazão de líquido seja grande para que haja um recobrimento razoável de líquido sobre a superfície do recheio. Grandes vazões de líquido, em muitos casos um sobre custo de bombeamento e tratamento do líquido utilizado para absorção.

Redes metálicas com mesh da ordem de 22 foram utilizadas com sucesso em evaporadores de película descendente quando se conseguiu eficiência 300% de evaporação para baixas vazões de líquido em comparação com uma superfície lisa, como pode ser vista na Figura 20.

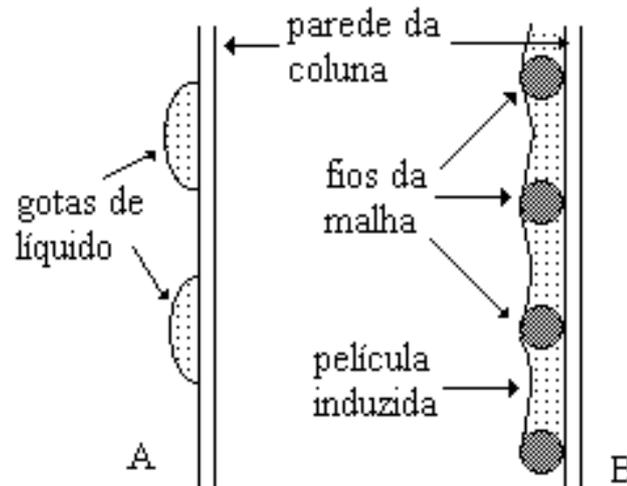


Figura 20 - Distribuição do líquido na superfície com e sem os fios de malha

O esquema A da Figura 20 mostra como um líquido se distribui quando é aspergido sobre uma superfície lisa. Já em B temos a situação na qual o líquido é jogado na rede justaposta à superfície. Os fios da rede, devido à própria ação da tensão superficial do líquido, induzem a formação da película.

Assim, este efeito será utilizado para elaboração de recheios para colunas de absorção. O recheio concebido está desenhado na Figura 21:

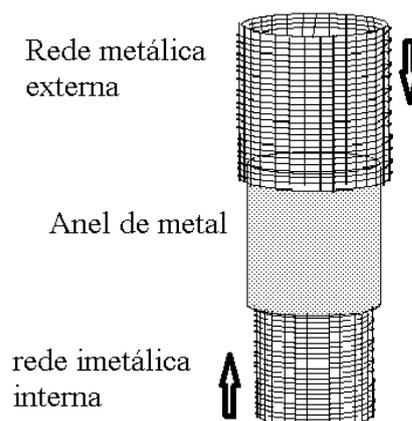


Figura 21 - Montagem do recheio anel de Raschig modificado



Figura 22 - Recheio Anel de Raschig Modificado (esquerda) e Pall Ring (direita)

3.3 MATERIAIS E INSTRUMENTOS

Um esquema simplificado do experimento (Figura 23) e o sistema construído na qual foi realizado o experimento (Figura 24) estão ilustrados a seguir:

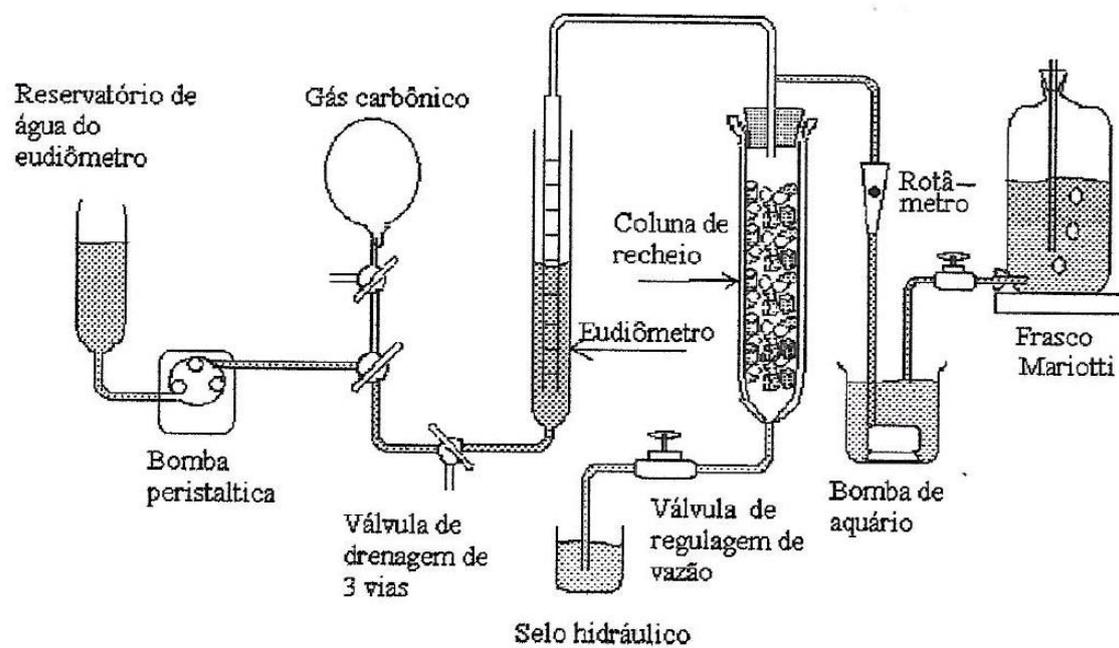


Figura 23 - Esquema simplificado do experimento



Figura 24 – Ilustração do experimento realizado

Os materiais e instrumentos utilizados no experimento são:

- Coluna de absorção;
- Recheio anéis de Raschig Modificado
- Recheio Pall Ring
- Eudiômetro
- Frasco Mariotti
- Bomba de aquário
- Rotâmetro
- Reservatório de água do eudiômetro
- Bomba peristáltica
- Válvula de drenagem de três vias

- 3 válvulas de regulação de vazão
- Cilindro de gás carbônico
- Cronômetro
- Béquier

3.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A principal medida do experimento é a taxa de absorção do CO_2 pela água na coluna recheada. Essa medida é realizada no instrumento chamado eudiômetro, que é composto basicamente por dois tubos, um tubo interno graduado e um tubo externo. O tubo externo é aberto à atmosfera, enquanto que o tubo interno está conectado com a parte superior da coluna recheada. Esclarecido isto, vamos à metodologia experimental.

Inicialmente, gás carbônico é bombeado dentro de todo o sistema com a finalidade de expulsar todo o ar contido originalmente. O CO_2 percorre o tubo interno do eudiômetro e segue até a coluna de absorção. Assim que é verificada a saída do CO_2 pela parte de baixo da coluna, o bombeamento é encerrado.

Feito isso, liga-se a bomba de aquário e uma vazão de água é imposta através da primeira válvula de regulação de vazão. Esta corrente de água entra pela parte de cima da coluna recheada. Conforme a água escorre pela coluna, absorve o CO_2 do sistema, tendo esse processo intensificado pela presença do recheio.

Na sequência, a bomba peristáltica é acionada de modo que a água entre por baixo do eudiômetro. À medida que o CO_2 é absorvido pela água dentro da coluna, o nível da água dentro do tubo interno do eudiômetro sobe, pois uma pequena depressão é formada no sistema. Uma pequena corrente de água cuja vazão é controlada por uma segunda válvula de regulação de vazão, equaliza os níveis da água do tubo interno com o externo. Esse procedimento garante que a pressão dentro da coluna seja atmosférica. Isso é realizado em conjunto com o selo hidráulico formado na parte de baixo da coluna de absorção, onde é de grande importância que o nível de água do selo se mantenha constante para não afetar no controle da pressão. Isso é feito através de uma terceira válvula de regulação de vazão.

Como o tubo interno do eudiômetro é graduado, é possível fazer a leitura do volume de CO_2 absorvido através da diferença de nível de água nesse tubo. Com a ajuda de um

cronômetro, mede-se o intervalo de tempo em que ocorre essa diferença de nível; logo, pode-se determinar uma taxa de absorção de CO_2 pela água na coluna recheada.

Outra medida obtida no experimento foi a vazão de água que percorre na coluna recheada. Esta medida foi feita através da coleta da água através de um béquer com massa conhecida. A partir da quantidade de água coletada num certo intervalo de tempo determinou-se a vazão de água do processo.

4. RESULTADOS

4.1 TAXA DE ABSORÇÃO

A taxa de absorção foi obtida para cada vazão a uma determinada pressão e temperatura através da medição utilizando o eudiômetro. Abaixo estão os dados obtidos com seus respectivos gráficos em função da vazão de líquido, primeiramente para o anel de Raschig modificado e em seguida para o Pall ring.

Tabela 1 - Taxa de absorção de CO₂ para o anel de Raschig modificado.

Vazão de líquido (g/s)	Taxa de absorção (mL/s)	Pressão (mmHg)	Temperatura (°C)
0,31	0,335	705	21
0,44	0,301	705	21
1,10	0,800	705	21
2,54	1,690	705	21
4,21	2,234	705	21
5,58	2,698	705	21
7,27	3,282	705	21
7,35	3,230	705	21

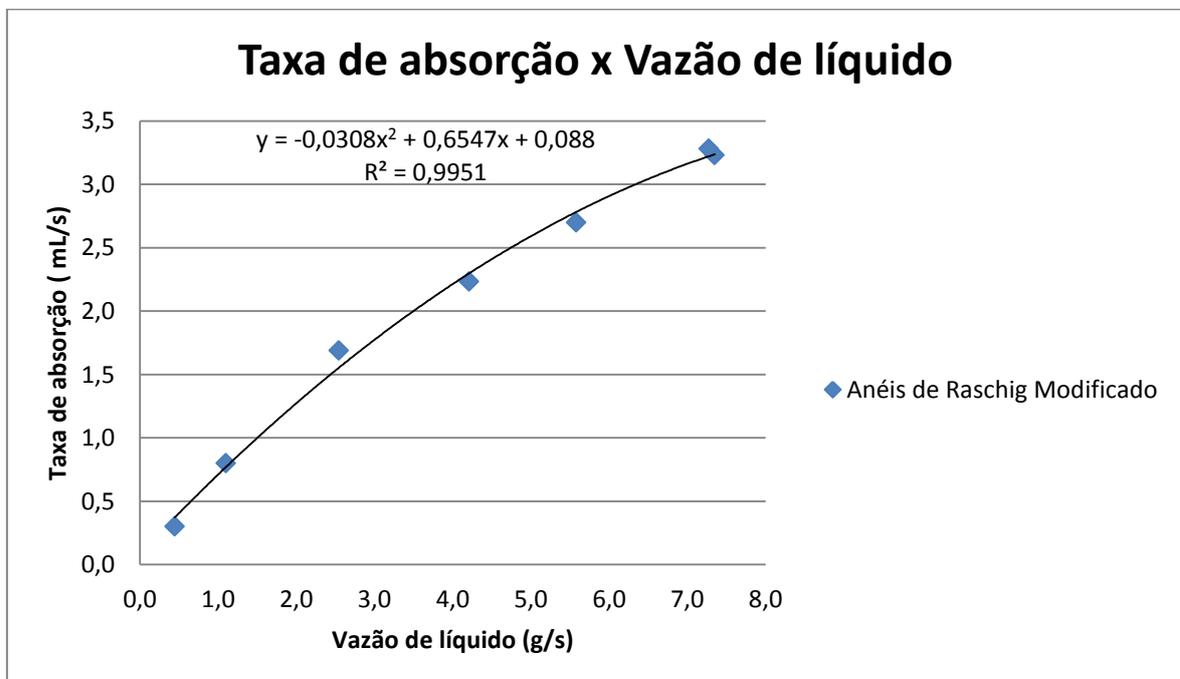


Gráfico 1 - Taxa de absorção de CO₂ em função da vazão de líquido utilizando anéis de Raschig modificado.

Tabela 2- Taxa de absorção de CO₂ utilizando o recheio Pall ring.

Vazão de líquido (g/s)	Taxa de absorção (mL/s)	Pressão (mmHg)	Temperatura (°C)
0,98	0,396	705	21
1,03	0,694	705	21
1,46	0,874	705	21
2,34	1,120	705	21
2,66	1,585	705	21
3,47	1,720	705	21
5,71	2,564	705	21
7,92	2,837	705	21

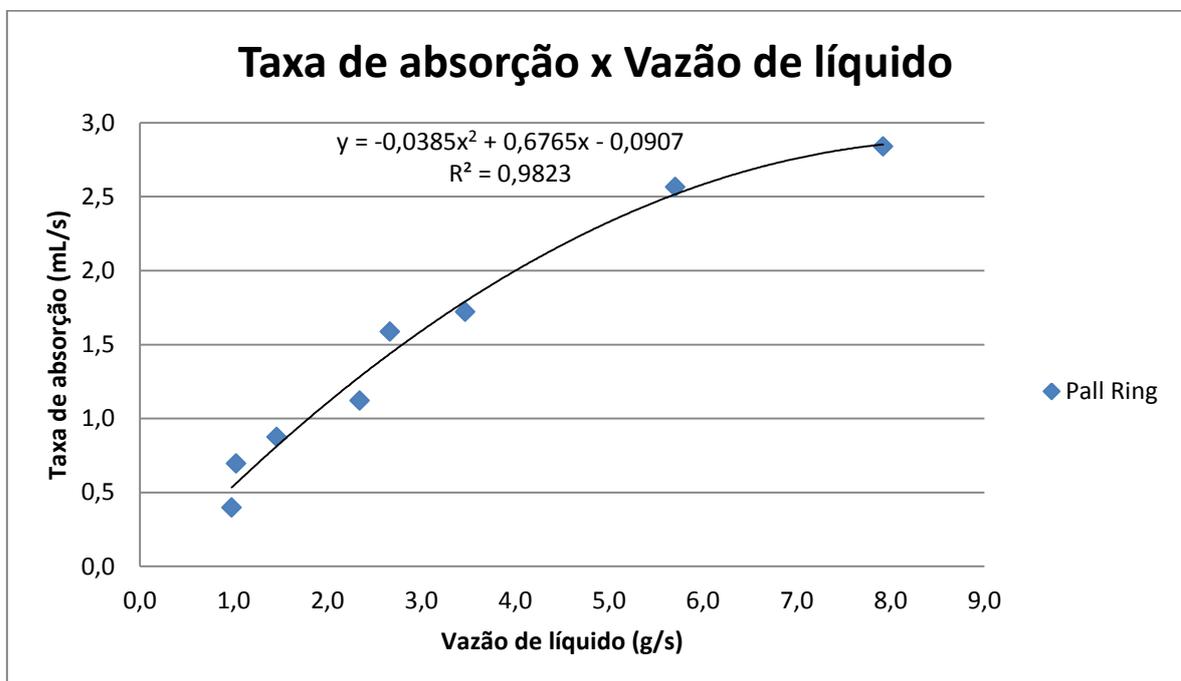


Gráfico 2 - Taxa de absorção de CO₂ em função da vazão de líquido utilizando o recheio Pall ring.

Comparando-se os dois gráficos de taxa de absorção de CO₂ obtidos em função da vazão de líquido, temos:

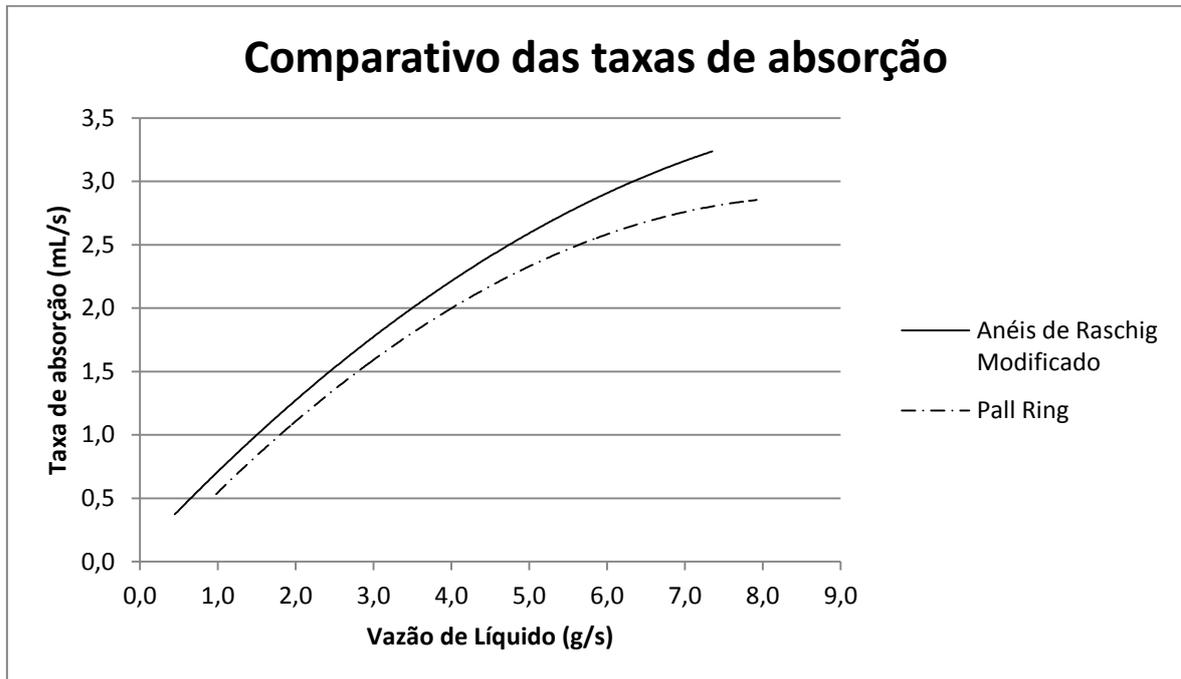


Gráfico 3 - Comparação da taxa de absorção de CO₂ entre os dois enchimentos.

4.2 CÁLCULO DO $k_x \cdot a$

As medidas das taxas de absorção de CO₂ geram os valores de $k_x \cdot a$ segundo o modelo de cálculo apresentado no capítulo de materiais e métodos.

Os dados obtidos durante o experimento são:

P - Pressão: 705 mmHg

T - Temperatura: 21 °C = 294,15 K

z - Altura do leito: 37 cm

D - Diâmetro da coluna: 5 cm

A - Área da coluna: 19,625 cm²

Abs - Taxa mássico de absorção de CO₂: variável para cada experimento

L - Vazão de líquido: variável para cada experimento

Para se calcular o $k_x \cdot a$, deve-se:

Converter a taxa de absorção de CO₂ de mL/s para mol/s:

$$\text{Taxa molar de abs. CO}_2 = \text{Abs}_{mol} = \frac{\text{Abs} * P}{T * R}$$

Calcular a fração molar de CO₂ na saída da coluna:

$$x_{A1} = \frac{\text{Abs}_{mol}}{\text{Abs}_{mol} + \frac{L}{18}}$$

E também a fração molar de CO₂ em equilíbrio no líquido:

$$x_{AS} = \frac{P}{H}$$

Onde H = constante de Henry, calculado pela seguinte equação:

$$\ln\left(\frac{H}{\text{MPa}}\right) = -6,8346 + 1,2817 * \frac{10^4}{T} - 3,7668 * \frac{10^6}{T^2} + 2,997 * \frac{10^8}{T^3}$$

Calculando assim, k_{x,a}:

$$k_{xA}a = \frac{L_M}{z} * \left(\frac{x_{AS} - x_{A2}}{x_{AS} - x_{A1}}\right)$$

Deste modo, abaixo são apresentados os valores de k_{x,a} calculados e seus respectivos gráficos em função da vazão de líquido, primeiramente para utilizando os anéis de Raschig modificado e em seguida o recheio Pall ring.

Tabela 3 - Valores de k_{x,a} para o anel de Raschig modificado.

Vazão de líquido (g/s)	k _{x,a} (mol/s.cm ²)	Pressão (mmHg)	Temperatura (°C)
0,44	0,000044	705	21
1,10	0,000127	705	21
2,54	0,000242	705	21
4,21	0,000270	705	21
5,58	0,000311	705	21
7,27	0,000367	705	21
7,35	0,000357	705	21

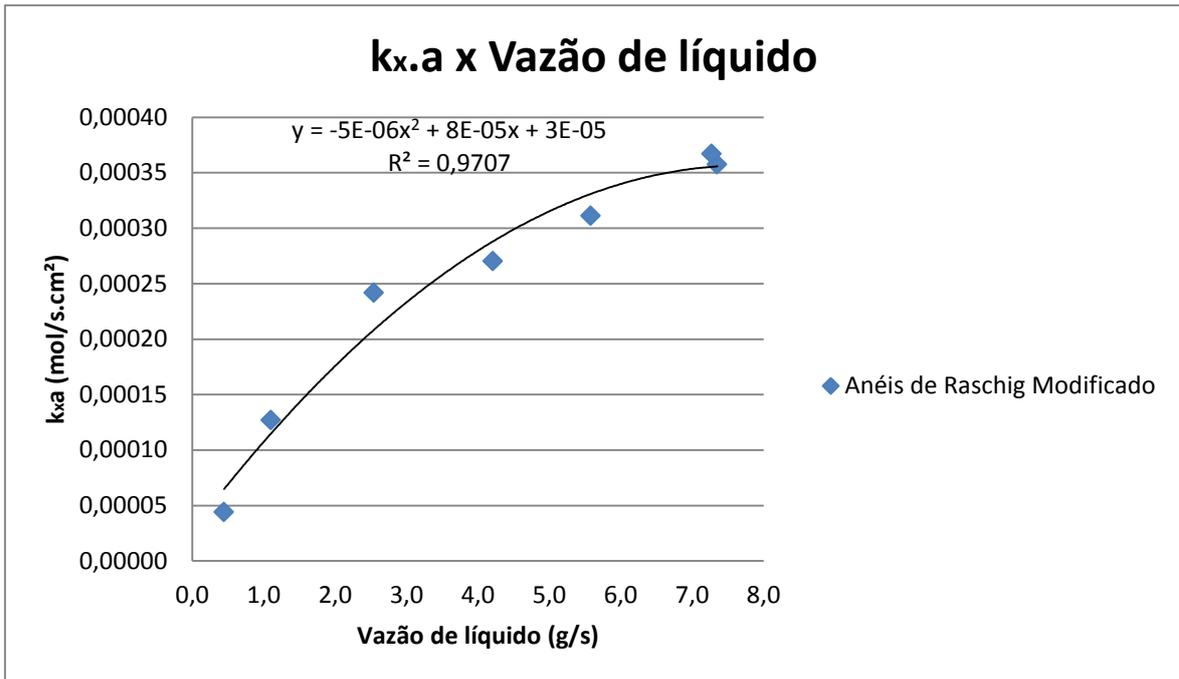


Gráfico 4 - $k_x.a$ em função da vazão de líquido para o anel de Raschig modificado.

Tabela 4 - Valores de $k_x.a$ para o Pall ring.

Vazão de líquido (g/s)	$k_x.a$ (mol/s.cm ²)	Pressão (mmHg)	Temperatura (°C)
0,98	0,000043	705	21
1,03	0,000101	705	21
1,46	0,000115	705	21
2,34	0,000128	705	21
2,66	0,000206	705	21
3,47	0,000201	705	21
5,71	0,000286	705	21
7,92	0,000293	705	21

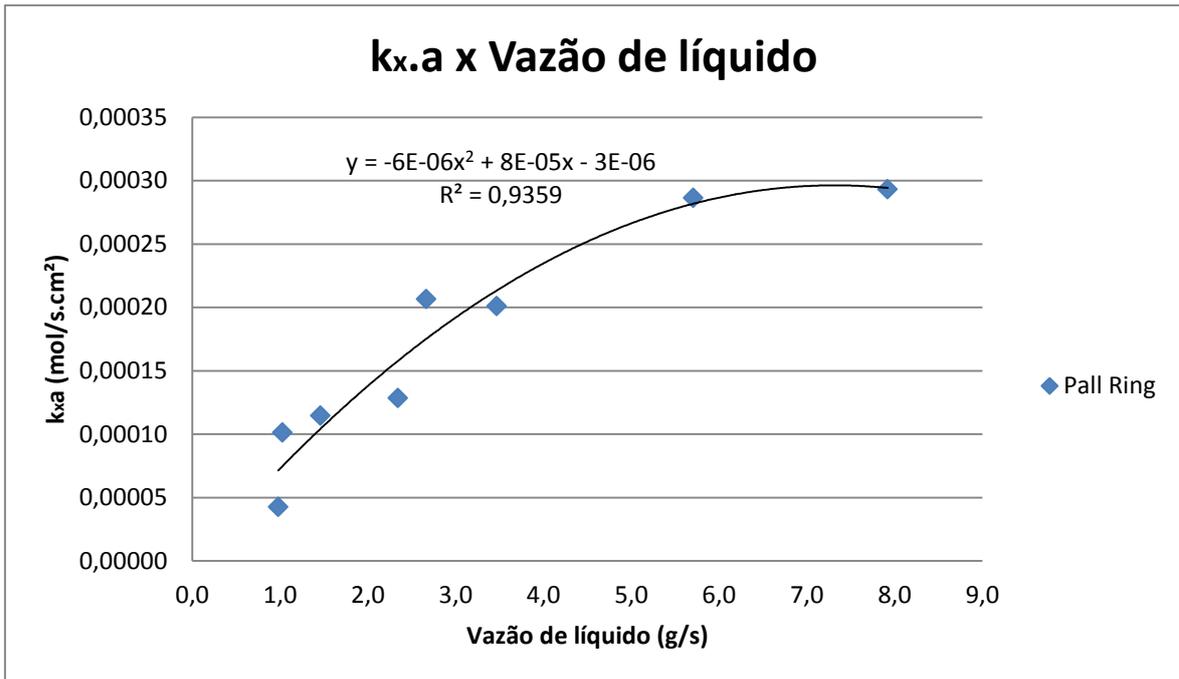


Gráfico 5 - k_{x.a} em função da vazão de líquido para o Pall ring.

Comparando-se os dois gráficos obtidos de k_{x.a} obtidos em função da vazão de líquido temos:

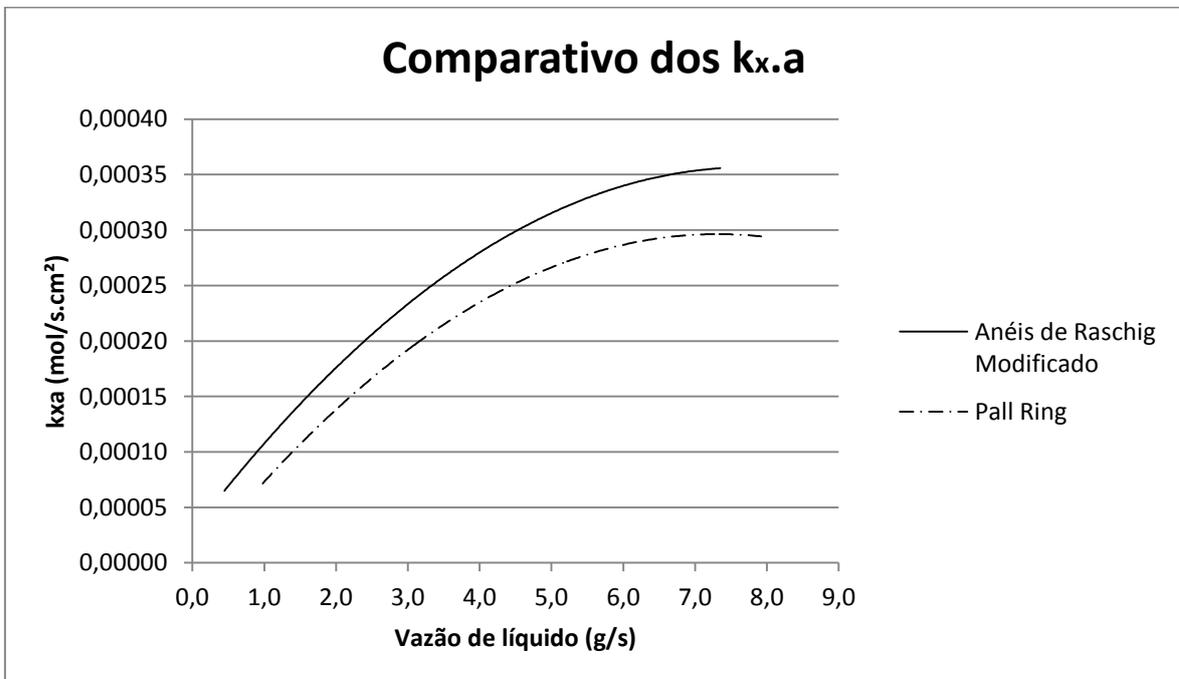


Gráfico 6 – Comparação dos valores de k_{x.a} entre os dois recheios. Para maior clareza de comparação, foram colocadas somente as curvas de tendência no gráfico.

5. CONCLUSÃO

Esperava-se que a eficiência do recheio Raschig modificado, medida pelo valor de $k_x \cdot a$, fosse bem maior do que o Pall ring para baixas vazões de líquido. Constatou-se que é apenas 100% maior, pois sua molhabilidade é bem maior. Por outro lado esperava-se que para vazões maiores de líquido os dois recheios apresentassem valores de $k_x \cdot a$ próximos ou o Pall ring fosse maior devido ao fato de provocar uma turbulência maior. Tal fato não sucedeu, o Raschig modificado continuou a ter um desempenho melhor do que o Pall ring, o que sugere que o principal fator no desempenho de um elemento de recheio seja a molhabilidade que ele fornece.

BIBLIOGRAFIA

BAKER, C. O. et alii. The Course of Liquor Flow Packed Towers. **Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.**, 31: 296, 1935.

BILLET, R. Recent Investigations of Metal Pall Rings (Distillation). **Chem. Eng. Prog.**, 63(9): 53, 1967.

BILLET, R., **Distillation Engineering Chemical Publishing Co.** New York, 2001.

CALDAS, J. N., Lacerda, A. I. **Torres Recheadas**, 1988.

CALDAS, J. N., **Internos de Colunas, Pratos e Recheios LTC**, 2003.

CHEN, G.K. **Packed Column Internals. Chemical Engineering**, pp 40-51; Mar. 1984.

DOLAN, M. J. & STRIGLE, R. F. Jr. Advances in Distillation Column Design. **Chem Eng. Prog.**, (11):78, 1980.

ECKERT, J.S. Design of Packed Columns. In: **Handb. Sep. Tec. Chem. Eng.**, Section 1.7, p. 221, Mc Graw-Hill.Co, 1979.

FARID, M. M. & GUNN, D. J. Liquid Distribution and Redistribution in Packed Columns-II. **Chemical Engineering Science**, 33: 1211, 1978.

GOMIDE, Reynaldo, **Operações Unitárias**, Capítulo III, Volume IV, 1988.

GUNN, D. J. Liquid Distribution and Redistribution in Packed Columns. **Chemical Engineering Science**, 33: 1211, 1978.

HUBER, M. & HILTBRUNNER, R. Packed Rectifying Column With Maldistribution. **Chemical Engineering Science**, 21 (9): 819, 1966.

HUBER, M. & MEIER, W. Sulzer Columns for Vacuum Rectification and Mass Transfer. **Sulzer Technical Review**, 1, 1975.

KOCH-GLITSCH. Disponível em: < <http://www.koch-glitsch.com>>. Acesso em: 5 agosto 2014.

KUK, M. S. Key Design Variables in Packed Towers. **Chem. Eng. Prog.**, (5): 68, 1979.

LEVA, M. **Tower Packing and Packed Tower Design**, U. S. Stoneware Co., Akron, 1953.

LEVA, M. **Chem. Eng. Prog. Symposium Series**, 50(10): 51, 1954.

LEVA, M. Flow Through Packing Beds. **Chem. Eng.**, 64, 261, 1957.

LUDWIG, E., **Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants: Vol. 2, 3ed.**, Gulf Professional Publishing ed., 1997.

MANNING, R. E. & CANNON, M. R. **Ind. Eng. Chem.**, 1957.

Mc CABE, W. L. & SMITH, J. C. **Unit Operations of Chemical Engineering**. Mc Graw-Hill Book Co., 3a ed., 1975.

McGLAMERY, G. G. **Liquid Film Transport Characteristics of Textured Metal Surfaces**, PhD Dissertation, The University of Texas at Austin, 1988.

MC DONALD, O. L. F. et alii. **Ind. Eng. Chem. Fundam.** 18(3): 199, 1979.

MEIER, W. & HUBER, M. Measurements of the Number of Theoretical Plates em Packed Columns With Artificial Maldistribution. **Proc. Int. Symp. Distill.**, 4: 31, 1969.

NINGBO T.C.I CO., LTD. Disponível em: < <http://www.mist-eliminator-demister.com>>. Acesso em 10 agosto 2014.

PERRY, R. H. & CHILTON, C. H., **Chemical Engineering Handbook**, 1973.

PERRY, R. H. & GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers Handbook**. Mc Graw-Hill, N. York, 6ª ed., 1984.

RICHARDSON, D. R. How to Design Fluid Flow Distributors. **Chem. Eng.**, may 1961.

SALVAGNINI, W. M. & TAQUEDA, M. E. S., **Comparative study of film promoters in falling-film evaporators**. In: 14th International Congress of Chemical and Process Engineering, 2000, Praha.

STRIGLE, R. F. & RUKOVENA, F. Jr. Packed Distillation Column Design. **Chem. Eng. Prog.**, 75(3): 86, 1979.

STRIGLE, R. F. & PERRY, D. A. Packed Towers Reduce Cost. **Hydrocarbon Process, Int. Ed.**, 60(2): 103, 1981.

SULZER. Disponível em: <<http://www.sulzer.com>>. Acesso em: 5 agosto 2014.

TREBAL, R.C. **Mass Transfer Operations**. Interscience, 3rd ed., 1980.

ZENZ, F. A. Design of Gas Absorption Towers. **Handb. Sep. Tech. Chem. Eng.**, Section 3.2, p. 49, Mc Graw-Hill Book Co., 1979.