



# DIMENSIONAMENTO DE UMA COLUNA DE ABSORÇÃO POR SOLUÇÕES AMINAS EM ESCALA PILOTO PARA CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

M. C. S. SILQUEIRA<sup>1</sup>, J. F. C. FILHO<sup>2</sup>, K.I. REZENDE<sup>3</sup>, B. W. M. SILVA<sup>4</sup> e S. N. RABELO<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Itaúna, Faculdade de Engenharia Mecânica

<sup>2</sup> Universidade de Itaúna, Faculdade de Engenharia Mecânica

<sup>3</sup> Universidade de Itaúna, Faculdade de Engenharia Mecânica

<sup>4</sup> Universidade de Itaúna, Faculdade de Engenharia Mecânica

<sup>5</sup> Universidade de Itaúna, Faculdade de Engenharia Mecânica e Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica  
E-mail para contato: sasanogueirarab@hotmail.com

**RESUMO** – A captura de CO<sub>2</sub> é motivada pelo aumento significativo da concentração desse gás na atmosfera, principalmente devido ao rápido crescimento industrial mundial. Além disso, o CO<sub>2</sub> é um dos principais gases contribuintes do efeito estufa. Um dos principais métodos de captura desse gás é por meio da absorção por aminas. Dessa forma, o presente trabalho objetiva realizar o dimensionamento de uma coluna de absorção feita em vidro em escala piloto com recheio estruturado para captura de CO<sub>2</sub> por meio de soluções aquosas de aminas operando à pressão atmosférica. O dimensionamento otimiza o processo de absorção à fim de evitar inundações e elevadas quedas de pressão na coluna. Para o dimensionamento da coluna, uma sequência de avaliação é desenvolvida: (1) seleção da estrutura contatora, que otimizará o contato entre as fases líquida e gasosa; (2) análise das condições de operação; (3) cálculo da altura da coluna baseada no cálculo da taxa de transferência de massa; (4) cálculo do diâmetro da coluna tendo como base as vazões de solvente e do gás, e considerações hidráulicas. A partir dessa sequência, a coluna de absorção foi dimensionada para operar com diferentes tipos de soluções de aminas, utilizadas em escala laboratorial.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de absorção baseia-se na transferência de um componente da fase gasosa para a líquida, na qual ele é solúvel. A absorção é, sem dúvida, a operação de purificação de gases mais importante e mais utilizada em larga escala industrial. Segundo Kohl e Nielsen (1997) o processo de absorção pode ser classificado baseado na interação entre solvente e soluto em solução física em reação reversível e irreversível.



No processo de absorção por reação química em um processo reversível, o dimensionamento da coluna de absorção é fator de extrema importância para o processo. O tamanho da coluna é fundamental para se obter uma ótima interação entre os componentes, reduzir as quedas de pressão e maximizar o rendimento do processo (AROONWILAS, 2001).

Desta forma, devido à relevância do dimensionamento de coluna para um processo de absorção reversível, o presente trabalho apresenta uma análise de dimensionamento para uma coluna de recheio de absorção para captura do CO<sub>2</sub> em escala laboratorial.

## 2. METODOLOGIA

O dimensionamento de uma coluna de absorção obedece a uma sequência lógica (KOHL E NIELSEN, 1997). Inicia-se com a escolha do solvente que será empregado na coluna, para que assim o *design* da coluna possa ser estabelecido. Para fins desse estudo, selecionaram-se soluções como as alcanolaminas (MEA, monoetanolamina), amino-2-metil-1-propanol (AMP) e piperazina (PZ), uma vez que esses componentes apresentam elevada capacidade de absorção de CO<sub>2</sub>. Assim, o dimensionamento da estrutura da coluna de absorção e seus componentes foram realizados de acordo com as etapas que são abordadas adiante.

### 2.1. Seleção Da Estrutura Contatora

De acordo com Kohl e Nielsen (1997) as estruturas contadoras que ocupam toda a seção transversal da torre da coluna de absorção possuem a função de promover uma extensa área de contato entre as fases líquida e gasosa, o que favorece a transferência de massa. Essas estruturas permitem melhor distribuição do líquido na coluna de modo que o gás a ser tratado tenha contato com a maior quantidade de solução possível.

Para formar essas estruturas contadoras em colunas de absorção, existem dois tipos principais de recheios: os randômicos e os estruturados (KOHL E NIELSEN, 1997). O primeiro tipo, é caracterizado por ser distribuído em várias unidades de forma aleatória na torre, enquanto o segundo pode ser definido como blocos compactos com estrutura bem definida que permitem uma melhor distribuição do líquido.

Estudos apontam que recheios randômicos e estruturados, geralmente, apresentam uma elevada área por unidade de volume, garantindo uma melhor troca de massa e baixa perda de carga, o que é vital para redução no consumo de energia (MELLO, 2013). Dessa forma, o recheio selecionado para realizar-se o dimensionamento da coluna foi o recheio estruturado pelo maior desempenho comparado ao recheio randômico em colunas de pequena escala (Kohl e Nielsen, 1997)

Os recheios estruturados são basicamente constituídos de lâminas metálicas cofiguradas com pequenas laminas de pequena espessura dispostas verticalmente na direção do fluxo ascendente da corrente gasosa. Estas são ranhuradas, perfuradas e possuem inclinação de 45°, de modo que o líquido escoe pelas ranhuras pela gravidade, e forme uma fina lamina, facilitado a troca de massas. (Nasser Junior, 2009)

FIGURA 1 - Exemplo de recheio estruturado “Mellapak 250 Y/X”



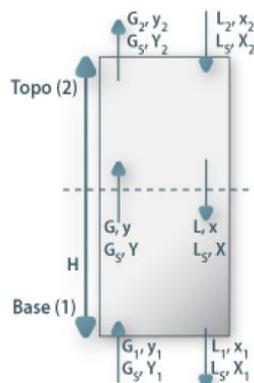
Fonte: Sulzer Chemtech, 2018

### 3. Análise Das Condições De Operação

O cálculo da altura da coluna baseia-se nos balanços de massa e energia, da força motriz para transporte de massa e dos coeficientes de transporte de massa. Enquanto o diâmetro da coluna, depende da vazão de gás, suas propriedades e da razão entre as vazões de líquido e gás (L/V). Já a altura e o volume total do recheio dependem da magnitude das concentrações desejadas e das velocidades de transferência de massa por unidade de volume de recheio (MELLO, 2013).

A FIGURA 1 apresenta um esquema para estimativa do balanço de massa da coluna de absorção contracorrente. As correntes de entrada são as vazões do gás rico em soluto e do líquido pobre em soluto; as correntes de saída são vazões de gás pobre em soluto e do líquido rico em soluto.

FIGURA 1 - Representação de um volume de controle.





Fonte: Adaptado de Separações e operações unitárias (2018).

Conforme observa-se nas Equações 1 e 2 aplicando-se um balanço molar entre a base e uma seção genérica da coluna, tem-se que:

$$\text{Mols de soluto na entrada} = \text{mols de soluto na saída} \quad (1)$$

$$L_x + G_1 \cdot y_1 + L_1 \cdot x_1 \quad (2)$$

Aplicando-se balanço de razão molar em correntes isentas de soluto para obtenção da linha de operação, obtêm-se as Equações 3, 4, 5 e 6:

$$L_s \cdot \left( \frac{x}{1-x} \right) + G_s \cdot \left( \frac{y_1}{1-y_1} \right) = L_s \cdot \left( \frac{x_1}{1-x_1} \right) + G_s \cdot \left( \frac{y}{1-y} \right) \quad (3)$$

$$L_s \cdot X + G_s \cdot Y_1 = L_s \cdot X_1 + G_s \cdot Y \quad (4)$$

$$G_s(Y_1 - Y) = L_s(X_1 - X) \quad (5)$$

$$Y = \left( \frac{L_s}{G_s} \right) \cdot X + Y_1 - \left( \frac{L_s}{G_s} \right) \cdot X_1 \quad (6)$$

A linha de operação para uma coluna de absorção não é uma reta, pois a absorção do componente na fase gasosa diminui essa corrente quando escoar pela coluna enquanto a vazão de líquido aumenta.

Aplicando-se o balanço molar entre o topo e a base, tem-se uma relação entre as velocidades das fases gasosa e líquida, fornecendo a inclinação da linha de operação, de acordo com as Equações 7 e 8.

$$L_s \cdot X_2 + G_s \cdot Y_1 = L_s \cdot X_1 + G_s \cdot Y_2 \quad (7)$$

$$\left( \frac{L_s \text{ mín}}{G_s} \right) = \frac{(Y_1 - Y_2)}{(X_{1\text{máx}} - X_2)} \quad (8)$$

Deve-se ressaltar que o caudal de líquido não pode ser inferior a um valor limite (mínimo) correspondente à obtenção de condições de saturação na base da coluna ( $X_{1\text{máx}}$ ) em equilíbrio com  $Y_1$ , conforme a Equação 9.

$$\left( \frac{L_s(\text{mín})}{G_s} \right) = \frac{(Y_1 - Y_2)}{(X_{1\text{máx}} - X_2)} \quad (9)$$

Este será o caudal mínimo de líquido para se conseguir remover  $G_s(Y_1 - Y_2)$  /mols de soluto "A" por unidade de tempo, obtendo-se uma composição máxima na corrente líquida de saída.

O projeto de uma coluna de absorção também tem como base o coeficiente global de transferência na fase gasosa. Por meio do balanço diferencial de soluto na fase gasosa, para uma vazão constante ao longo da coluna, tem-se que a quantidade de soluto absorvida na altura “dz” é igual a velocidade de absorção multiplicado pelo volume diferencial, conforme a Equação 10.

$$-V \cdot dy = K_g \cdot a \cdot (y - y^*) \cdot S \cdot dz \quad (10)$$

Em que,

$S$  = seção transversal da coluna ( $m^2$ ),  $dz$  = variação da altura da coluna (m),  $y$  = fração molar da fase gasosa,  $y^*$  = fração molar de equilíbrio com a fase líquida,  $K_g \cdot a$  = coeficiente global de transferência de massa na fase gás ( $kg \cdot mol/h \cdot m^3 \cdot atm$ ).

Rearranjando-se a Equação 10, e considerando como constantes os termos  $K_g \cdot a$  e  $V$ , têm-se que:

$$\frac{K_g \cdot a \cdot S}{V} \cdot \int dz = \int (dy - y - y^* \cdot y_e \cdot y_s) \quad (11)$$

Logo, a altura da coluna pode ser determinada pela Equação 12:

$$Z_t = \frac{V}{S} \cdot \int_{y_s}^{y_e} \frac{dy}{y - y^*} \quad (12)$$

Em que a integral da Equação 12 representa a variação da concentração no vapor dividida pela força motriz média, e é chamada de número de unidades de transferência (NUT). Já o primeiro termo da equação é conhecido como altura de uma unidade de transferência (HUT). Logo, obtém-se uma expressão simples para o equacionamento da altura de uma coluna de absorção dada pela Equação 13, em que o NUT pode ser calculado pela Equação 14.

$$Z_t = HUT \cdot NUT \quad (13)$$

$$NUT = (y_s - y_e) / \ln \frac{(y_s - y_s^*)}{(y_e - y_e^*)} \quad (14)$$

### 3.1. Cálculo Do Diâmetro Da Coluna

De acordo com Kohl e Nielsen (1997), um dos métodos possíveis para o dimensionamento do diâmetro de colunas de recheio é feito por meio da queda de pressão admissível com o intuito de evitar inundação, condição em que ocorre aumento da queda de pressão no sistema, perda de rendimento na absorção e aumento no consumo de energia para bombeamento do fluido. Falcão (2011), aborda que, usualmente, a literatura sugere que colunas sejam projetadas para operar com quedas de pressão entre 200 e 400 (Pa/m de coluna). Assim, a partir da Correlação de Sherwood determinou-se a perda de carga da coluna (FALCÃO, 2011)



Dessa forma, pode-se obter a vazão de inundação “G”. Já a vazão de operação “GOP” é o equivalente a 40% da vazão de inundação para sistemas muito espumantes e 80% da vazão de inundação para sistemas pouco espumantes. Pode-se então, calcular o diâmetro da coluna de recheio por meio da Equação 15.

$$DT = \sqrt{4G \cdot \pi \cdot GOP} \quad (15)$$

### 3.2. Dimensões Da Coluna

A partir da metodologia descrita e em comparação com outros trabalhos a coluna para absorção de CO<sub>2</sub> com aminas poderá ter uma coluna de vidro com altura cerca de 1 metro e diâmetro de 0,3 metros. Além disso, é recomendado que a coluna tenha recheio estruturado a fim de reduzir quedas de pressão e proporcionar um escoamento mais uniforme da solução absorvedora, evitando acúmulos nas laterais do recipiente. Valores similares foram encontrados por Mello (2013) para dimensionamento de uma coluna piloto de pequeno porte

## 4. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta o dimensionamento de uma coluna de absorção por meio de equações apresentadas na literatura, obtendo-se dimensões para a coluna quando soluções diferentes são empregadas no processo de captura de CO<sub>2</sub>. Verificou-se que a altura da coluna é mais influenciada pela concentração da solução absorvedora, enquanto o diâmetro é mais afetado pelos valores de vazão. Para escala laboratorial, espera-se trabalhar com uma coluna de absorção com cerca de 1 metro de altura e 0,3m de diâmetro em que se possa variar as concentrações das soluções de MEA, AMP e PZ, bem como as vazões. Em trabalhos futuros espera-se realizar a montagem da coluna em conjunto com o recheio, e analisar o processo de absorção para captura de CO<sub>2</sub> com as soluções aminas abordadas.

## 5. NOMENCLATURA

Nomenclatura (unidade)	Grandeza
H (m)	Altura do Enchimento
1 (Adimensional)	Base da Coluna
y (Adimensional)	Fração Molar de Solute Na Fase Gasosa
x (Adimensional)	Fração Molar De Solute Na Fase Líquida
Y (Adimensional)	Mol De Solute/Mol De Gás
X (Adimensional)	Mol De Solute/Mol De Líquido
S (m <sup>2</sup> )	Seção Transversal Da Coluna
2 (Adimensional)	Topo Da Coluna
Gs(mols s <sup>-1</sup> )	Vazão Molar De Gás Constante Ao Longo Da Coluna
Ls(mols s <sup>-1</sup> )	Vazão Molar De Líquido Constante Ao Longo Da Coluna
G(mols s <sup>-1</sup> )	Vazão Molar Molar De Gás Ao Longo Da Coluna
G'(mol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Vazão Molar Molar De Gás Por Unidade De Área (G/S)
L (mol.s-1)	Vazão Molar Molar De Líquido Ao Longo Da Coluna
L'(mol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Vazão Molar Molar De Líquido Por Unidade De Área (L/S)



## 6. REFERÊNCIAS

FALCÃO, P. **Equacionamento de torres de absorção**. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011.

KOHL, A. L.; NIELSEN, R. **Gas purification**. Elsevier, 1997.

LAFER, M. Z. **Estudo da absorção de CO<sub>2</sub> em aminas: avaliação das demandas térmicas para uma coluna de escala industrial**. Dissertação (Trabalho de conclusão curso) - Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MELLO, L. C. **Estudo do processo de absorção de CO<sub>2</sub> em soluções de aminas empregando-se colunas recheadas**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

NASSER JUNIOR, Roberto. **Otimização das colunas de absorção da recuperação de acetona na produção de FilterTow por meio de estudos fenomenológicos e análise estatística**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2009.

**Separações e operações unitárias**. Disponível em: [http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com\\_content&task=view&id=17&Itemid=135](http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=135). Acesso em: 22 jun. 2018.

AROONWILAS, A. Effects of operating and design parameters on CO<sub>2</sub> absorption in columns with structured packings. **Separation and Purification Technology**, v. 24, n. 3, p.403-411, 2001.