



SICIT 2018

Semana de Iniciação
Científica e Tecnológica

Universidade de Itaúna

DIMENSIONAMENTO DE UMA COLUNA DE ABSORÇÃO: UTILIZAÇÃO EM PROCESSO DE CAPTURA DE CO₂ POR SOLUÇÕES AMINAS

Matheus Camargos Santos Silqueira, Universidade de Itaúna, matheuscamargos1@hotmail.com.
Brendon Wallace Menezes Silva, Universidade de Itaúna, BrendonWallace@live.com.
Gustavo Nogueira Barros, Universidade de Itaúna, gustavo.n.barros@hotmail.com.
Josiane Rodrigues dos Santos Pinto, Universidade de Itaúna, josianerodriguesp@yahoo.com.br.
Juventino Feitosa de Camargos Filho, Universidade de Itaúna, nino.camargos@hotmail.com.
Karina Ingrid Rezende, Universidade de Itaúna, karinarezzende@gmail.com.
Marco Túlio Silva Menezes, Universidade de Itaúna, marcotulio2985@hotmail.com.
Vinicius Henrique Sousa Nunes, Universidade de Itaúna, viniciushsnunes@hotmail.com.
José Felipe Dias, Universidade de Itaúna, josefelipedias@gmail.com.
Ewerton Nogueira, Universidade de Itaúna, labmetal@uit.com.
Sabrina Nogueira Rabelo, Universidade de Itaúna, sasanogueirarab@hotmail.com.

Resumo: A captura de CO₂ é motivada pelo aumento significativo da concentração desse gás na atmosfera, principalmente nos últimos anos, dado ao rápido crescimento industrial mundial. Além disso, o CO₂ é um dos principais gases contribuintes do efeito estufa. As principais técnicas desenvolvidas para captura do CO₂ são: absorção química, adsorção, tecnologia de membranas, criogenia, entre outros. Desta forma, o presente trabalho objetivou o dimensionamento de uma coluna de absorção feita em vidro em escala piloto, com recheio estruturado, para ser empregada no processo de captura de CO₂ 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 foi 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. À partir dessa sequência, a coluna de absorção foi dimensionada para operar com diferentes tipos de soluções de aminas, utilizadas em escala laboratorial.

Palavras-chave: Coluna de absorção. Dimensionamento. CO₂. Recheio.

1 Introdução

Absorção refere-se à 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 no âmbito industrial (KOHL; NIELSEN, 1997).

Dentre as aplicações desse método, além das absorção para captura de CO₂ por soluções aminas, pode-se citar a purificação de gases de combustão, a remoção de CO₂ na fabricação da amônia, a absorção de cloreto de hidrogênio na água para produção de ácido clorídrico, entre outras. O processo de absorção pode ocorrer por duas formas: química e física. A TABELA 1 apresenta as vantagens e desvantagens desses dois métodos de absorção (MELLO, 2013).

TABELA 1 – Absorção física versus absorção química



SICIT 2018

Semana de Iniciação Científica e Tecnológica

Universidade de Itaúna

Vantagens	
Absorção física	Absorção química
Altas concentrações na corrente gasosa (acima de 10% molar)	Baixas concentrações na corrente gasosa (entre 1 e 10% molar)
Pressões parciais acima de 13 atm	Baixas pressões parciais
	Maior pureza do gás a ser tratado
Desvantagens	
Maiores custos de investimentos operacionais	Necessidade de altas concentrações de solvente

Fonte: Adaptado de MELLO (2013, p.18)

Segundo Kohl e Nielsen (1997) o processo de absorção pode ser classificado baseado na interação entre solvente e soluto em solução física, reação reversível e irreversível. Na absorção com solução física o componente a ser absorvido é mais solúvel no absorvente do que qualquer outro componente presente no gás. Porém, não há reação química entre as fases.

Na classificação de reação reversível existe uma reação química de ligação fraca entre o componente a ser absorvido e o solvente. A reversão do processo, ou seja, a desabsorção, se dá por meio do aumento da temperatura do solução, de modo que o componente absorvido seja separado do solvente, e esse último reaproveitado. O presente trabalho utiliza de um processo desse tipo – absorção por soluções aminas com reação reversível.

Já para a reação irreversível, conforme o nome sugere, ocorre uma reação entre o componente absorvido e o solvente, porém o produto formado não pode ser separado, ou seja, não é possível realizar a desabsorção do elemento.

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.

Existem dois tipos principais de colunas de absorção, as recheadas e as de prato. As colunas recheadas se mostram mais favoráveis em relação às colunas de pratos, uma vez que o desenvolvimento de recheios utilizados em processos contracorrente permitem melhor desempenho durante a absorção. Conforme mostra a TABELA 2, a coluna em recheio é adequada para: pequenas instalações industriais, fluidos corrosivos, líquidos que tendem à espumar, e situações em que baixas quedas de pressão são desejadas.

TABELA 2 – Características do processo de absorção com colunas de pratos e recheio

Colunas de pratos	Colunas de recheio
Reações lentas	Baixa perda de carga
Diâmetros acima de 1 metro	Soluções absorvedoras que tendem a criar espuma
Pressões elevadas	Baixas pressões
	Fluidos corrosivos

Fonte: Adaptado de MELLO (2013, p.21)

Desta forma, devido a relevância do dimensionamento de coluna em um processo de absorção reversível, o presente trabalho objetiva apresentar uma análise de dimensionamento para uma coluna de recheio de absorção para captura do gás tóxico, dióxido de carbono (CO_2), em escala laboratorial.

2 Metodologia

O dimensionamento de uma coluna de absorção deve obedecer uma sequência lógica conforme descrito por Kohl e Nielsen (1997). O projeto se inicia 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 de amina como as alcanolaminas MEA (monoetanolamina), AMP (amino-2-metil-1-propanol) e Piperazina (PZ), uma vez que esses componentes apresentam elevada taxa de absorção de CO_2 .

O dimensionamento da estrutura da coluna de absorção e seu componentes foi realizado de acordo com as etapas que serão 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, estudos apontam para dois tipos principais de recheios: os randômicos e os estruturados. O primeiro tipo, como o próprio nome diz, 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. As FIGURAS 1 e 2, exemplificam esses tipos de recheios.

FIGURA 1 - Exemplo de recheio randômico em anéis metálicos



Fonte: Clark Solutions, 2018.

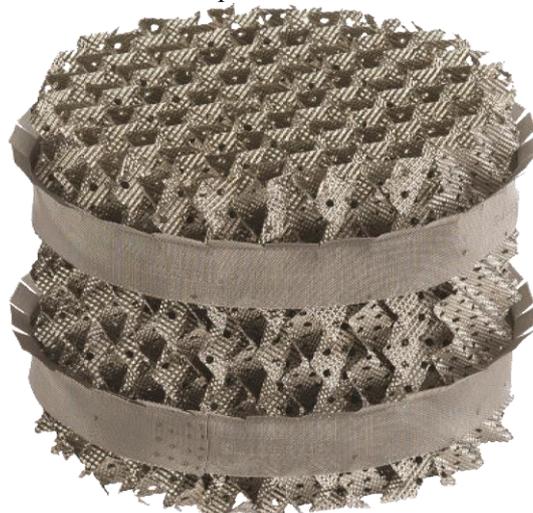


SICIT 2018

Semana de Iniciação Científica e Tecnológica

Universidade de Itaúna

FIGURA 2 - Exemplo de recheio estruturado “Mellapak 250 Y/X”



Fonte: Sulzer Chemtech, 2018.

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). A TABELA 3 apresenta as condições de operação para recheio randômico e estruturado.

TABELA 3 – Condições operacionais para recheio randômico e estruturado

Estrutura contatora		
Condições operacionais	Recheio randômico	Recheio estruturado
Baixa pressão (< 100 mmhg)	2	3
Pressão moderada	2	1
Alta pressão	2	0
Fluxo de líquido baixo	1	2
Sistemas que espumam	3	0
Colunas com pequenos diâmetros	3	2
Notas: 0 = não utilizado; 1 = avaliar cuidadosamente; 2 = geralmente aplicado; 3 = melhor escolha		

Fonte: Adaptado de KOHL; NIELSEN (1997, p.7)

2.2 Análise das condições de operação

As condições de operações devem ser definidas de acordo os resultados da absorção que se deseja obter. A coluna em questão foi projetada para operar à 25°C e 1 atm. As demais condições de operação e variáveis de pré dimensionamento estão apresentadas nas TABELAS 4 e 5.



TABELA 4 – Variáveis do pré dimensionamento

GRANDEZA	VALOR	UNIDADE
Vazão volumétrica de gás	4800	Nm ³ /h
Vazão superficial do gás	0,57197	m/s
Vazão superficial do líquido	0,003125	m/s
Fração molar de CO ₂ no gás alimentado	0,1	mol CO ₂ / mol Ar+CO ₂
Fração molar de CO ₂ no líquido alimentado	0	mol CO ₂ / mol Solução+CO ₂
Concentração da solução de amina na entrada	0,3	Kg amina/Kg solução
Pressão de operação da coluna	1 101,3	atm kPa
Temperatura ambiente externa à coluna	25 298,15	°C K
Massa molecular do ar	29	kg/kgmol
Massa específica do ar	1,179	kg/m ³
Densidade molar do ar	0,041	kgmol/m ³

Fonte: Adaptado de LAFER (2011, p.21-23).

TABELA 5 – Condições operacionais da coluna

GRANDEZA	VALOR	UNIDADE
Vazão molar de gás	214,1	kgmol/h
Vazão mássica de gás	6531,4	kg/h
Vazão volumétrica de gás	5239	m ³ /h
Fluxo molar de gás	84,2	kgmol/h.m ²

Fonte: Adaptado de LAFER (2011, p.21-23).

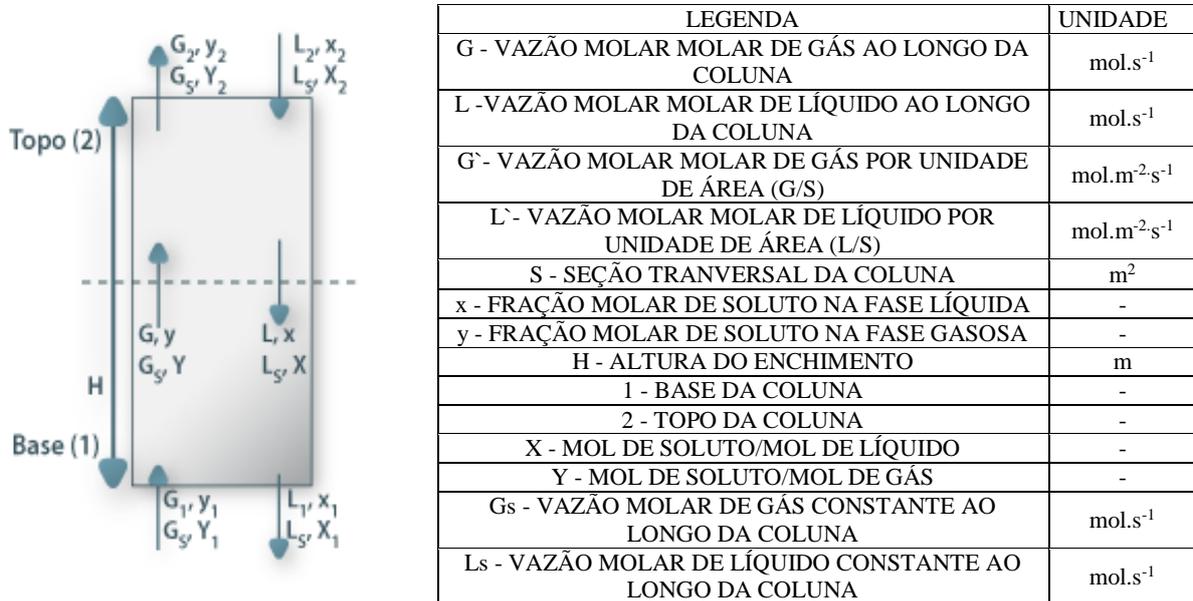
3 Resultados e Discussão

3.1 Cálculo da altura da coluna baseada no cálculo da transferência de massa

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), e 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 3 apresenta um esquema para estimativa do balanço de massa da coluna de absorção contracorrente, em que um volume de controle está representado. 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 3 - 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:

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

$$L \cdot x + G_1 \cdot y_1 = G \cdot y + L_1 \cdot x_1 \quad (2)$$

Aplicando-se balanço de razão molar em correntes isentas de soluto para obtenção da linha de operação, têm se que:

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

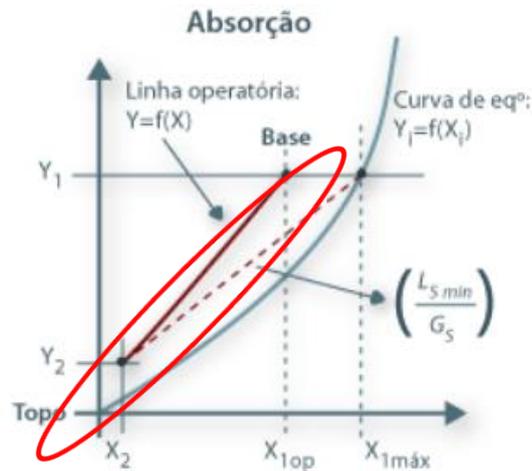
$$L_s \cdot X + G_s \cdot Y_1 = L_s \cdot X_1 + G_s \cdot Y \quad (4)$$

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

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

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, conforme nota-se na FIGURA 4 (MELLO, 2013).

FIGURA 4 – Curva do processo de absorção na coluna de dimensionamento



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

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.

$$Ls \cdot X2 + Gs \cdot Y1 = Ls \cdot X1 + Gs \cdot Y2 \quad (7)$$

$$\left(\frac{Ls}{Gs}\right) = \frac{(Y1-Y2)}{(X1-X2)} \quad (8)$$

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 ($X1_{máx}$ em equilíbrio com $Y1$), conforme a EQUAÇÃO 9.

$$\left(\frac{Ls_{min}}{Gs}\right) = \frac{(Y1-Y2)}{(X1_{máx}-X2)} \quad (9)$$

Este será o caudal mínimo de líquido para se conseguir remover $GS(Y1-Y2)$ /moles 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. A FIGURA 5 mostra uma versão simplificada da coluna para auxílio no cálculo da altura.

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.

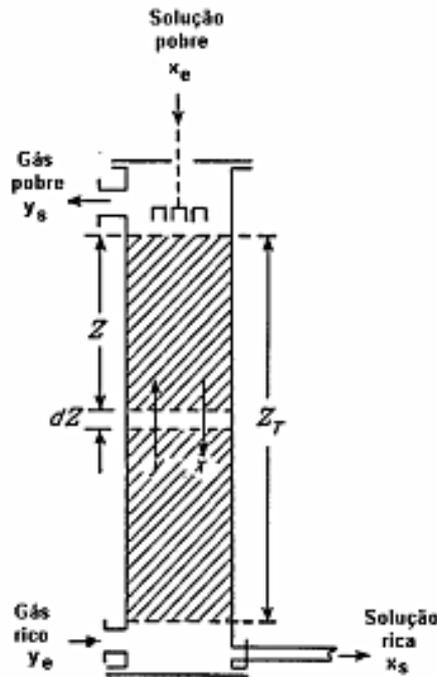
$$-V \cdot dy = Kg \cdot a \cdot (y - y^*) \cdot S \cdot dz \quad (10)$$

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, $Kg.a$ = coeficiente global de transferência de massa na fase gás ($kg.mol/h.m^3.atm$)

FIGURA 5 – Coluna simplificada para cálculo da altura



Fonte: MELLO (2013, p.27)

Rearranjando-se a EQUAÇÃO 10, e considerando como constantes os termos $Kg.a$ e V , têm-se que:

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

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

$$Zt = \frac{V}{Kg.a} \cdot \int_{y_s}^{y_e} \frac{dy}{y-y^*} \quad (12)$$

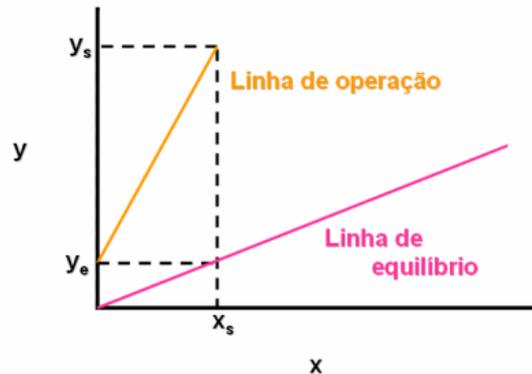
Em que a integral da EQUAÇÃO 12 representa a variação da concentração no vapor dividida pela força motriz média, e é chamada de número de unidades de transferência (NUT). Já o primeiro termo da equação é conhecido como altura de uma unidade de transferência (HUT). Logo, obtém-se uma expressão simples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

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

A FIGURA 6 apresenta o diagrama do esquema das linhas de operação e equilíbrio para um processo de absorção em contracorrente. Além disso, o termo NUT pode ser calculado pela equação em sequência, EQUAÇÃO 14.



FIGURA 6 – Diagrama das linhas de operação e equilíbrio



Fonte: KOHL; NIELSEN (1997, p.15)

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

3.2 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). A TABELA 6 apresenta os valores do fator “Fp” para queda de pressão nos recheios mais empregados. Os valores de queda de pressão podem ser obtidos no gráfico de Sherwood representado pela FIGURA 7.

TABELA 6 – Fator “F” para queda de pressão em torres recheadas

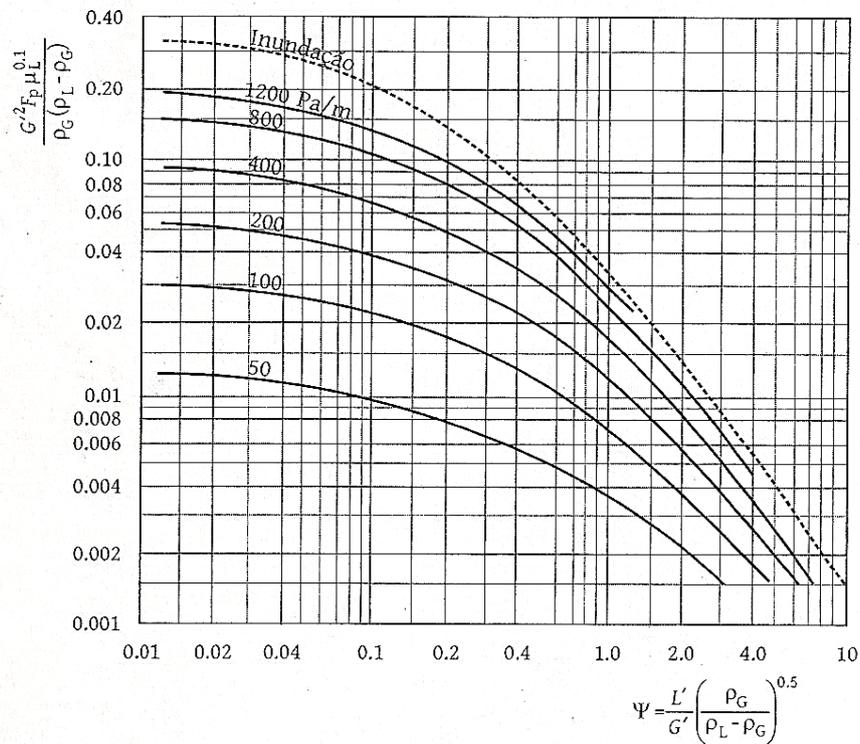
FATOR "F" PARA QUEDA DE PRESSÃO EM TORRES RECHADAS												
RECHEIO	MATERIAL	TAMANHO NOMINAL DO RECHEIO(in)										
		1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	3	3 1/2
SELAS SUPER INTALOX	C	-	-	-	-	-	60	-	-	30	-	-
SELAS SUPER INTALOX	P	-	-	-	-	-	40	-	-	28	18	-
SELA INTALOX	C	725	330	200	-	145	92	-	52	40	22	-
SELA INTALOX	P	-	-	-	-	-	33	-	-	21	16	-
ANÉIS DE RASCHIG	C	1600	1000	580	380	255	179	125	93	65	37	-
ANÉIS DE RASCHIG	M	700	390	300	170	155	115	-	65	45	-	-
ANÉIS DE RASCHIG	M	-	-	410	300	220	144	110	83	57	32	-
SELAS DE BERL	C	900	-	-	-	170	110	-	65	45	-	-
ANÉIS DE PALL	P	-	-	-	95	-	55	-	40	26	-	17
ANÉIS DE PALL	M	-	-	-	81	-	56	-	40	27	-	18

NOTAS: C= CERÂMICA; P=PLÁSTICO; M=METAL

Fonte: Adaptado de KOHL; NIELSEN (1997, p.29)



FIGURA 7 – Gráfico de Sherwood de queda de pressão para colunas de recheio



Fonte: Adaptado de FALCÃO (2011, p.11)

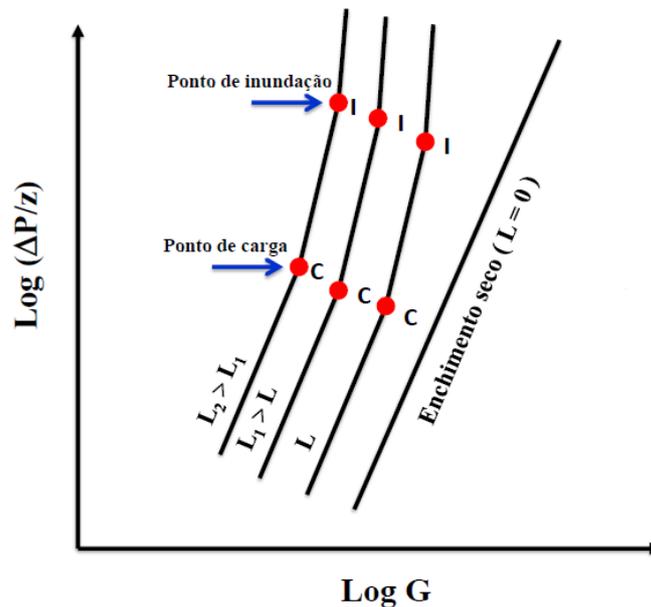
A partir da Correlação de Sherwood, estabelecem-se valores para a ordenada e abscissa, por meio das EQUAÇÕES 15 e 16, respectivamente.

$$\frac{L'}{G'} \cdot \frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G)} \tag{15}$$

$$\frac{G'^2 F \mu_L^{0,1}}{\rho_G (\rho_L - \rho_G)} \tag{16}$$

Assim determinou-se a perda de carga do sistema “ΔP/Z”, e pode-se encontrar o ponto de carga e de inundação da coluna por meio da FIGURA 8.

FIGURA 8 – Gráfico de perda de carga da coluna



Fonte: Adaptado de FALCÃO (2011, p.10)

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 17.

$$D_T = \sqrt{\frac{4G}{\pi G_{OP}}} \quad (17)$$

3.3 Dimensões da coluna

A partir da metodologia descrita e em comparação com outros trabalhos a coluna para absorção de CO₂ 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 diferentes para a coluna quando soluções diferentes são empregadas no processo de captura de CO₂. Foi verificado 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 CO₂ com as soluções aminas abordadas.

Referências

FALCÃO, Pablo. **Equacionamento de torres de absorção**. 2011. 17 f. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011.

KOHL, Arthur L.; NIELSEN, Richard. **Gas purification**. Elsevier, 1997.

LAFER, Michel Zonenschein. **Estudo da absorção de CO₂ em aminas: avaliação das demandas térmicas para uma coluna de escala industrial**. 2011. 37 f. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MELLO, Lilian Cardoso de. **Estudo do processo de absorção de CO₂ em soluções de aminas empregando-se colunas recheadas**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

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