

## **ABSORÇÃO EM COLUNA DE RECHEIO**

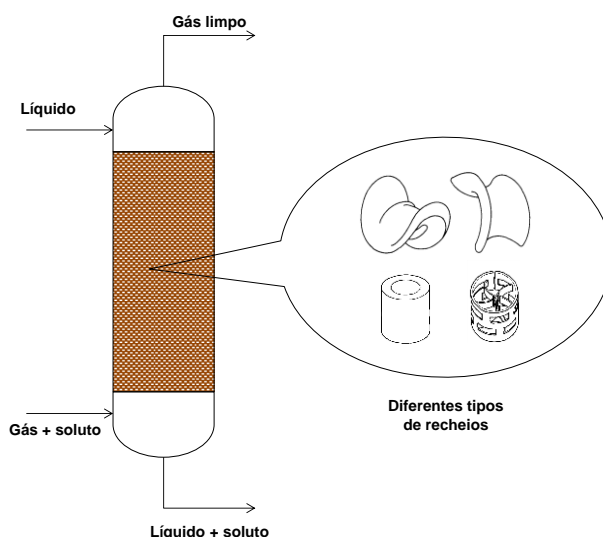
---

## 1. Objetivo

O objetivo da presente prática será a familiarização com um processo comum na indústria química como é a lavagem de correntes gasosas contaminadas com um poluente de natureza ácida (ou básica) com uma solução básica (ou ácida) mediante um processo de absorção reativa. No caso, será estudado o processo de absorção de  $\text{CO}_2$  em uma solução de hidróxido de sódio.

## 2. Introdução teórica

A absorção é uma operação unitária consistente em que um ou vários solutos se absorvem da fase gasosa e passam à líquida. Este processo implica uma difusão molecular turbulenta ou uma transferência de massa do soluto através do gás B (gás portador) até um líquido C. O gás será geralmente insolúvel no líquido C, da mesma forma que o líquido não se volatilizará e passará ao gás B. Este processo pode ser realizado mediante o contato contínuo ou intermitente entre fases. No sistema empregado, o contato será contínuo e ocorrerá ao longo da torre de absorção. As colunas de absorção têm geralmente forma cilíndrica, entrando o gás pela parte inferior, e o líquido pela parte superior através de um sistema distribuidor. O gás depurado sai pela parte superior da torre, enquanto o líquido enriquecido sai pela parte inferior. Na Figura 1 é apresentado um esquema básico deste tipo de sistema.



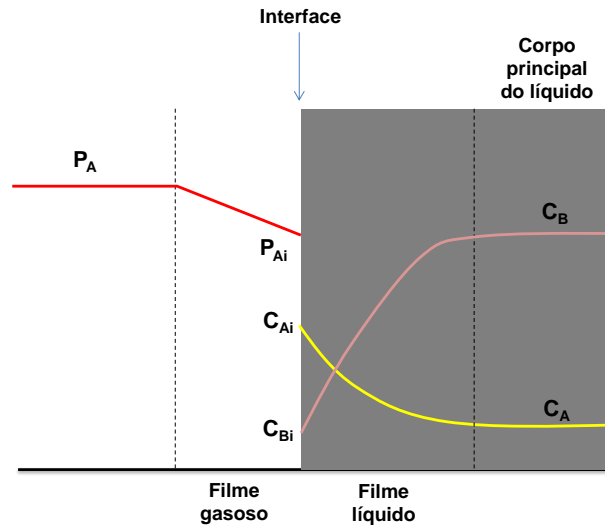
**Figura 1.** Esquema de um processo de absorção em torre empacotada

O processo de transferência de matéria pode ser melhorado se associado a um processo reativo. Desta forma, a “remoção” constante do soluto da solução torna o

processo muito mais eficiente. Para o desenho deste tipo de sistema serão aplicados os princípios básicos de desenho de colunas empacotadas com a adição de um processo reativo. Suponha-se o processo reativo da equação 1.



No caso de se ter um processo reativo envolvido ao processo de absorção, o perfil de concentrações que aparecerá na coluna terá uma forma similar à mostrada na Figura 2.



**Figura 2.** Esquema de um processo de absorção reativa

Conforme a figura, deverão ser considerados quatro processos: o que acontece no filme gasoso, no filme líquido, na interface líquido-gás e o processo reativo. Considerando o caso genérico que envolve todas as resistências, a expressão que determina o transporte de A (soluto) desde o seio do gás até a solução virá dada pela equação 2.

$$-r_A = \frac{1}{\frac{1}{k_{Ag}a} + \frac{H_A}{k_{Al}aE} + \frac{H_A}{kC_Bf_1}} p_A \quad (2)$$

O parâmetro  $k_{Ag}a$  é o coeficiente de transporte de massa volumétrico na fase gás,  $k_{Al}a$  é o correspondente na fase líquida,  $H_A$  é a constante de Henry,  $E$  é um fator de aumento de absorção no filme líquido pelo efeito da reação,  $k$  é a constante de velocidade,  $C_B$  é a concentração do reagente B presente exclusivamente no líquido e  $f_1$  é a fração ocupada pelo líquido no espaço livre da coluna. O primeiro termo do denominador se corresponde com a resistência imposta pelo filme gasoso, o segundo termo se corresponde com a resistência imposta pela fase líquida e finalmente o último termo se corresponde com a resistência imposta pelo corpo do líquido onde acontecerá a reação química.

No caso de operar-se com um sistema onde o componente A se encontra puro, a resistência da fase gasosa será desprezível, resultando na equação 3.

$$-r_A = \frac{1}{\frac{H_A}{k_{Al}aE} + \frac{H_A}{kC_Bf_1}} p_A \quad (3)$$

O parâmetro de desenho deste tipo de sistemas é a altura do leito de recheio. Para seu cálculo será necessário considerar um elemento diferencial de altura para o reator “dz”, onde acontece o processo de transferência de soluto considerado. Definindo  $F_g$  como ao fluxo de gás portador e  $F_l$  ao fluxo de líquido suporte,  $Y_A$  aos mols de soluto/mols de portador e  $X_B$  aos mols de reagente B/mols de inerte no líquido, têm-se as seguintes equações para o processo reativo.

$$\left( \begin{array}{c} \text{A perdido} \\ \text{pelo gas} \end{array} \right) = \frac{1}{b} \left( \begin{array}{c} \text{B perdido} \\ \text{pelo líquido} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{consumo de A} \\ \text{pela reação} \end{array} \right) \quad (4)$$

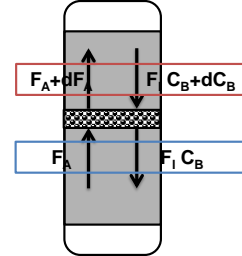
$$F_g dY_A = -\frac{1}{b} F_l dX_B = -r_A S dz \quad (5)$$

Pela integração da equação anterior será possível estimar a altura necessária da torre para um determinado processo de absorção.

$$z = \frac{F_g}{S} \int_{Y_{A1}}^{Y_{A2}} \frac{dY_A}{(-r_A)} = \frac{F_l}{Sb} \int_{X_{B2}}^{X_{B1}} \frac{dX_B}{(-r_A)} \quad (6)$$

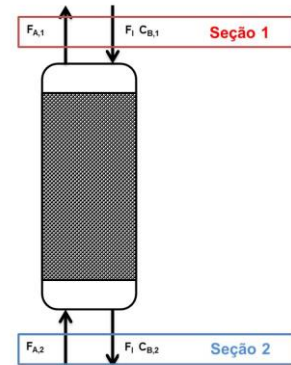
No caso particular do experimento, dado que o componente A ( $\text{CO}_2$ ) se encontra puro e o componente B ( $\text{NaOH}$ ) se encontra diluído, o balanço de massa da equação 5 pode ser simplificado resultando na equação 7, onde  $C_T$  é a concentração total.

$$dF_A = -\frac{F_1}{bC_T} dC_B = (-r_A) a S dz \quad (7)$$



Aplicando o balanço à coluna, obtém-se a seguinte equação que permitirá saber qual é a quantidade de  $\text{CO}_2$  absorvida (seção 1 a superior da coluna e seção 2 como superior;  $\Delta F_A = F_{A2} - F_{A1}$ ).

$$F_{A2} - F_{A1} = \frac{F_1}{bC_T} (C_{B1} - C_{B2}) \quad (8)$$

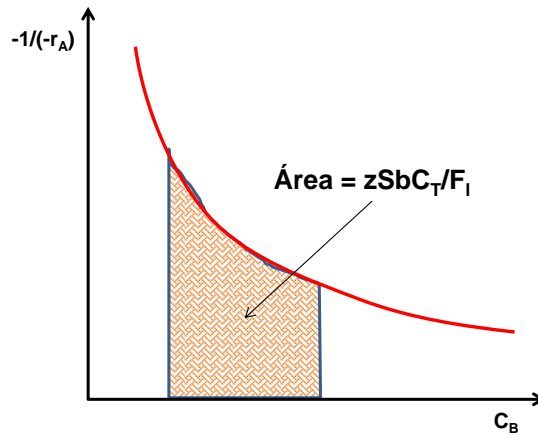


Com isto será possível saber ao longo da coluna a quantidade de  $\text{CO}_2$  que foi absorvida. O valor de  $C_B$  é importante, pois influencia na velocidade de absorção de A (equação 3).

Finalmente, para sistemas diluídos, a altura da coluna poderá ser calculada pela equação 9.

$$z = \frac{F_1}{SbC_T} \int_{C_{B2}}^{C_{B1}} \frac{dC_B}{(-r_A)} \quad (9)$$

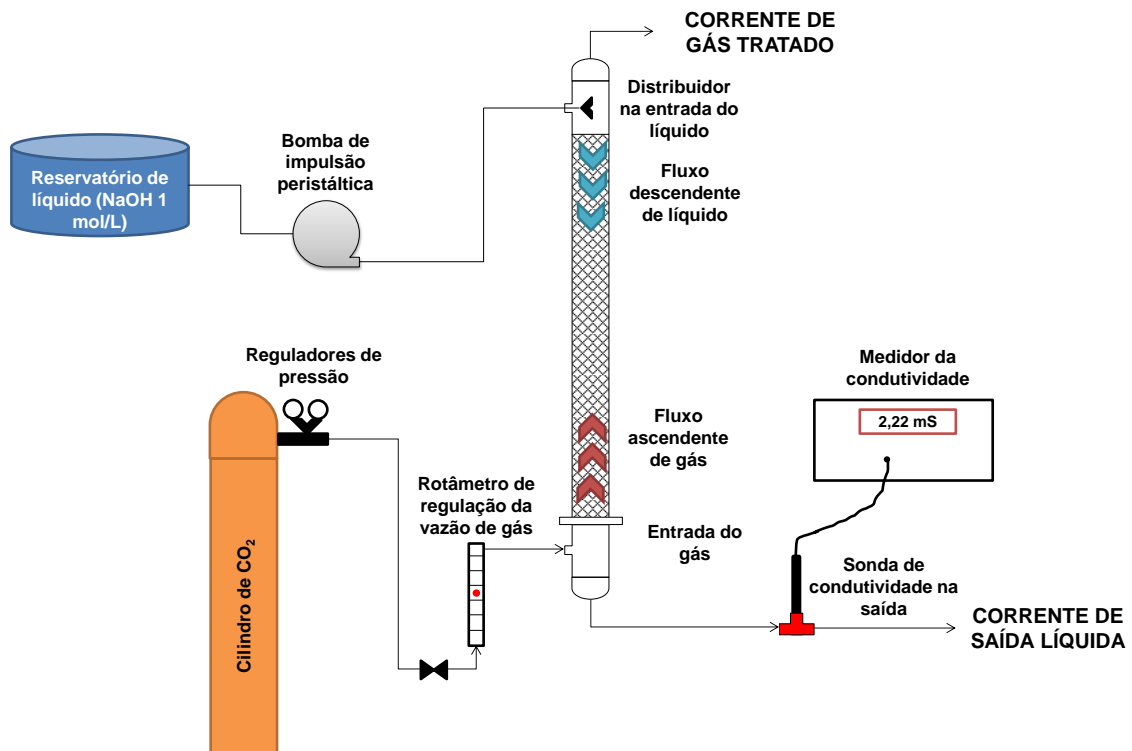
A resolução do presente exercício vai requerer a integração numérica da equação 9, tal como mostrado na Figura 3.



**Figura 3.** Resolução gráfica para o cálculo da altura da torre de absorção

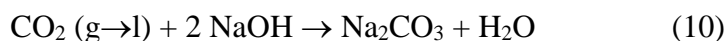
### 3. Instalação experimental

A instalação experimental consiste em uma coluna de recheio de anéis Rasching de comprimento 0,65 metros e 0,05 metros de diâmetro. Na Figura 4 é apresentado um esquema do dispositivo experimental.



**Figura 4.** Instalação experimental de absorção

O gás a tratar, CO<sub>2</sub> no caso, se introduz pela parte inferior da coluna com o fluxo controlado com ajuda de um rotâmetro e uma válvula de agulha de regulação fina. O gás ascenderá pela coluna forçado pelo sifão de líquido na parte inferior da coluna que impede a saída do gás. Na parte superior acessar a corrente líquida de NaOH com ajuda de uma bomba peristáltica. Ambas as correntes entrarão em contato na coluna em contracorrente com objeto de tornar mais eficiente a transferência de massa. Portanto, o processo que ocorre na coluna é definido pela equação 10.



Na saída pelo fundo existe uma adaptação para acoplamento de uma sonda de condutividade, de modo a medir a variação da mesma até atingir um valor estacionário. A transferência de matéria ocorre no interior da coluna de absorção onde as duas correntes entrarão em contato. Uma bureta de 10 mL será utilizada no experimento para titular a solução de NaOH efluente com HCl com fenolftaleína como indicador. Para evitar as interferências dos carbonatos, será necessária a adição de BaCl<sub>2</sub>, fazendo com que os carbonatos precipitem na forma de BaCO<sub>3</sub>.

#### 4. Materiais

Para a realização da prática será necessário:

- a) Instalação experimental já descrita.
- b) Cilindro de dióxido de carbono com reguladores de pressão (consultar o professor).
- c) Hidróxido de sódio (4 litros de solução 0,1 mol/L).
- d) Sonda de condutividade com o correspondente condutivímetro.
- e) Bomba peristáltica
- f) Regulador de vazão do gás com válvula de agulha incluída.
- g) Reservatório de 2 litros de hidróxido de sódio.
- h) Cloreto de bário.
- i) Ácido clorídrico (1 litro de solução 0,1 mol/L).

j) Bureta de 10 mL.

## 5. Procedimento operacional

A seguinte sequência operacional será realizada ao longo da prática:

1. Preparar as soluções necessárias na prática (4 litros de solução 0,1 mol/L de NaOH e 1 litro de 0,1 mol/L de HCl).
2. Situar a solução de NaOH na linha de alimento da bomba.
3. Ligar a bomba na posição correspondente a 40 mL/min e esperar até observar a saída de líquido pela parte inferior da coluna.
4. Neste momento, anotar a condutividade e coletar uma amostra de 10 mL em erlenmeyer para titulação com HCl (lembrar de adicionar uma ponta de espátula de BaCl<sub>2</sub>). Titular com a bureta de 10 mL.
5. Ligar o fluxo de gás em uma vazão de 100 mL/min. Checar a saída de gás pela parte superior da coluna.
6. Monitorar a condutividade cada 2 minutos até chegar a um valor constante.
7. Neste momento, anotar o novo valor e coletar uma amostra de 10 mL para titulação com HCl (lembrar de adicionar 0,5 g de BaCl<sub>2</sub>). Titular com a bureta de 10 mL.
8. Repetir o processo com as outras vazões volumétricas: 30, 20 e 10 mL/min nesta sequência.
9. Uma vez finalizado o experimento, coletadas e tituladas todas as amostras, a etapa final será a lavagem da coluna. Para isto, substituir a solução de NaOH 0,1 mol/L no alimento da bomba por água destilada, monitorando a condutividade até obter um valor próximo ao da água destilada.
10. Deixar o sistema limpo para o novo grupo de estudantes do dia seguinte.

## 6. Discussão de resultados

Responder às seguintes questões:



- Representar graficamente a evolução da condutividade com o tempo para as quatro vazões utilizadas. Justificar a forma da curva.
- Preencher a seguinte tabela

<b>Vazão volumétrica líquido = 10 mL/min</b>		
<b>Tempo</b>	<b><math>\Omega</math></b>	<b><math>[\text{OH}^-] = C_{\text{NaOH}}</math></b>
0	$\Omega_0 = \dots$	$[\text{OH}^-]_0 = C_{\text{NaOH},1} = \dots$
$\infty$	$\Omega_\infty = \dots$	$[\text{OH}^-]_\infty = C_{\text{NaOH},2} = \dots$

<b>Vazão volumétrica líquido = 20 mL/min</b>		
<b>Tempo</b>	<b><math>\Omega</math></b>	<b><math>[\text{OH}^-] = C_{\text{NaOH}}</math></b>
0	$\Omega_0 = \dots$	$[\text{OH}^-]_0 = C_{\text{NaOH},1} = \dots$
$\infty$	$\Omega_\infty = \dots$	$[\text{OH}^-]_\infty = C_{\text{NaOH},2} = \dots$

<b>Vazão volumétrica líquido = 30 mL/min</b>		
<b>Tempo</b>	<b><math>\Omega</math></b>	<b><math>[\text{OH}^-] = C_{\text{NaOH}}</math></b>
0	$\Omega_0 = \dots$	$[\text{OH}^-]_0 = C_{\text{NaOH},1} = \dots$
$\infty$	$\Omega_\infty = \dots$	$[\text{OH}^-]_\infty = C_{\text{NaOH},2} = \dots$

<b>Vazão volumétrica líquido = 40 mL/min</b>		
<b>Tempo</b>	<b><math>\Omega</math></b>	<b><math>[\text{OH}^-] = C_{\text{NaOH}}</math></b>
0	$\Omega_0 = \dots$	$[\text{OH}^-]_0 = C_{\text{NaOH},1} = \dots$
$\infty$	$\Omega_\infty = \dots$	$[\text{OH}^-]_\infty = C_{\text{NaOH},2} = \dots$

- Calcular a quantidade de  $\text{CO}_2$  absorvida aplicado à equação 8 ( $b = 2$ ;  $C_T = 55,6$  mol/L) na operação estacionária.
- Estimar o valor de  $k_{1a}$  do sistema de recheio. Para isto, deve ser integrada a equação 9. A princípio, seria necessário usar a equação 3. Entretanto, será usada a equação simplificada 11, supondo que a reação química de neutralização é instantânea.

$$-r_{\text{CO}_2} = (k_{\text{CO}_2,1}a) \frac{P_{\text{CO}_2}}{H_{\text{CO}_2}} \left( 1 + \frac{H_{\text{CO}_2} D_{\text{NaOH}} C_{\text{NaOH}}}{bD_{\text{CO}_2} P_{\text{CO}_2}} \right) \quad (11)$$

Dados:  $H(\text{CO}_2) = 25000 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ ;  $D(\text{CO}_2) = 1,8\cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $D(\text{NaOH}) = 3,06\cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $P(\text{CO}_2) = 101300 \text{ Pa}$ ; concentração em mol/m<sup>3</sup>

A altura da torre pode ser estimada pela equação 12.

$$z = \frac{F_1}{bSC_T} \cdot \frac{H_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{1}{(k_1a)} \int_{C_{\text{NaOH},\infty}}^{C_{\text{NaOH},0}} \frac{dC_{\text{NaOH}}}{\left( 1 + \frac{H_{\text{CO}_2} D_{\text{NaOH}} C_{\text{NaOH}}}{bD_{\text{CO}_2} P_{\text{CO}_2}} \right)} \quad (12)$$

A integração da equação anterior dá lugar à equação 13, a partir do qual o único parâmetro desconhecido é  $(k_{\text{CO}_2,1}a)$ .

$$z = \frac{F_1}{SC_T} \frac{1}{(k_{\text{CO}_2,1}a)} \frac{D_{\text{CO}_2}}{D_{\text{NaOH}}} \ln \left( \frac{2D_{\text{CO}_2} + H_{\text{CO}_2} D_{\text{NaOH}} C_{\text{NaOH},1}}{2D_{\text{CO}_2} + H_{\text{CO}_2} D_{\text{NaOH}} C_{\text{NaOH},2}} \right) \quad (13)$$

- Para torres de absorção, o coeficiente de transferência de massa na fase líquida ( $k_1$ ) pode ser estimado a partir de uma correlação empírica de dependência potencial entre o próprio coeficiente e a velocidade mássica do líquido ( $G_L$ , Kg/(m<sup>2</sup>s)), assumindo que as propriedades do líquido permanecem constantes com independência da vazão volumétrica. A equação que define esta correlação é a 14, onde  $c$  e  $c_0$  são parâmetros empíricos do ajuste dos dados.

$$k_{\text{CO}_2,1} = c_0 G_L^c \quad (14)$$

O cálculo de  $G_L$  é feito dividindo a vazão volumétrica pela área transversal da coluna ( $S$ ) e corrigindo pela densidade do líquido ( $\rho_L$ ), que será considerada igual à

da água ( $1 \text{ kg/m}^3$ ), tal como mostrado na Equação 14. Comparar os valores obtidos com aqueles disponíveis na literatura: MCCABE W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOT, P. **Unit Operation of Chemical Engineering**, Ed. McGraw-Hill Int., 7<sup>th</sup> edition, New York, USA, 2005, pp. 600-601. Que conclusões podem ser tiradas dos valores obtidos?

## 7. Leituras recomendadas

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

MCCABE W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit operation of Chemical Engineering**, 7<sup>th</sup> edition, New York, USA: McGraw-Hill Int., 2005.

GEANKOPLIS, C. J. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. México Ceca, 1998.