

ARTIGO

DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA

J. C. Gubulin*

GUBULIN, J.C. Determinação e análise do coeficiente de transferência de massa. *Rev. Ensino Eng.*, S. Paulo, 2: 121-129, 1ª sem. 1983.

O coeficiente de transferência de massa desempenha um importante papel em muitas operações da Engenharia Química. Com o objetivo de apresentar ao aluno o problema de sua determinação experimental, é explorado, didaticamente, um equipamento simples e de fácil operação. Foi determinado e analisado o coeficiente de transferência de massa de um soluto entre duas fases líquidas em movimento.

Transferência de massa. Coeficiente de transferência de massa. Fenômenos de transporte. Transporte de massa convectivo.

GUBULIN, J.C. Determination and analysis of mass transfer coefficient. *Rev. Ensino Eng.*, S. Paulo, 2: 121-129, 1ª sem. 1983.

Mass transfer coefficient play an important role in many chemical engineering operations. A simple piece of equipment of easy operation is didactically explored with the objective of introduce to the students the problem of its determination. The mass transfer coefficient of a solute between two moving liquid phase is determined and analysed.

Mass transfer. Mass transfer coefficient. Transport phenomena. Convective mass transfer.

1. INTRODUÇÃO

Em um trabalho anterior¹ foi apresentada uma metodologia para a determinação do coeficiente de difusão; agora nossa atenção se volta para a determinação do coeficiente de transferência de massa completando assim nosso objetivo de apresentar ao aluno, em laboratório, os dois parâmetros fundamentais do processo de transferência de massa. Nas correlações de predição estes parâmetros estão relacionados e seus valores são fundamentais no projeto de muitas instalações industriais, sobretudo aquelas relacionadas com processos de extração por solvente.

Escolheu-se para análise um sistema binário e estudou-se o processo de transferência de um soluto entre duas fases líquidas em movimento.

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O processo de transferência de massa em sistema convectivos tem lugar, basicamente, no seio de fluidos e está inseparavelmente ligado às condições de movimento destes.

A análise cuidadosa deste problema consiste em escrever as equações diferenciais de transporte de quantidade de movimento, energia e massa bem como as equações complementares dos valores no contorno e das condições iniciais. Um exemplo de solução pode ser encontrado no trabalho de BAIRD e HO², estudado em condições isotérmicas e no regime permanente.

Dada à complexidade do tratamento matemático e da própria formulação do problema é muitas vezes conveniente fazer-se uso de simplificações adequadas. Abandona-se assim a equa-

* Depto. de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.

ção diferencial de transporte de massa no seio do fluido e se escreve a seguinte relação empírica:

$$\phi_i^j = \pm K_{ic}^j (C_{is}^j - C_{ir}^j) \quad (1)$$

relação que define o coeficiente local de transferência de massa K_{ic}^j .

Nesta relação temos:

ϕ_i^j : densidade de fluxo do componente i , na fase j , avaliado em uma dada posição da superfície de separação das fases (relativo a eixos de coordenadas estacionários)

C_{is}^j : concentração local do componente i , na fase j , avaliado na mesma posição onde se avaliou a densidade do fluxo.

C_{ir}^j : concentração de referência do componente i , na fase j , avaliado no seio da fase j , em movimento.

O sinal na equação (1) deve ser escolhido de forma a tornar positivo o coeficiente de transferência de massa.

Como a densidade de fluxo (mássico ou molar) bem como as concentrações (mássicas ou molares, frações mássicas ou molares, etc...) admitem uma diversidade de definições, existirá uma diversidade de coeficientes de transferência de massa. Isto é indicado pelo índice c em K_{ic}^j .

Mesmo que se conheça o fluxo e se defina uma concentração de referência no seio do fluido, a aplicação da relação (1) está indefinida uma vez que a concentração na interface é desconhecida.

Uma hipótese amplamente aceita, com exceção de casos de resistências interfaciais, como por exemplo a presença de tensoativos, é a de que existe equilíbrio de fases na interface, ou seja, as concentrações interfaciais em uma fase estão relacionadas termodinamicamente com as concentrações interfaciais em outra fase se existir o contato entre elas. Assim, na interface, vale a relação:

$$\hat{f}_{is}^I = \hat{f}_{is}^{II} \quad (2)$$

onde \hat{f}_{is} é a fugacidade do componente i na solução, avaliado na interface.

A equação (2) estabelece uma igualdade das fugacidades nas fases I e II em contato e, conseqüentemente, uma relação entre as composições interfaciais das duas fases.

O problema e o tratamento de transferência de massa entre fases está descrito em praticamente todos os textos de fenômenos de transporte.

3. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE K_p

Trataremos o caso simples da transferência de massa entre uma fase orgânica, saturada com água, colocada no seio de uma fase aquosa em movimento. Estaremos apenas interessados em avaliar o coeficiente de transferência de massa do soluto (fase orgânica) na fase aquosa. Abandonaremos portanto o índice j . Por outro lado usaremos a densidade de fluxo em base mássica e as concentrações em termos de concentrações em massa, pelo seu uso freqüente em Engenharia Química. Assim, temos:

ϕ_i : massa do componente i cruzando a unidade de área na unidade de tempo

ρ_i : massa do componente i , por unidade de volume da solução

Nestas condições a relação (1) torna-se

$$\phi_i = K_{ip} (\rho_{is} - \rho_{ir}) \quad (3)$$

onde se escolheu o fluxo como um número positivo.

O equipamento utilizado está esquematizado na figura 1. Consta de uma célula cilíndrica, de vidro, com 60cm de comprimento e 0,70cm de raio. Na parte superior da célula foi construída, em vidro, uma obstrução de forma ogival, com prosseguimento em haste fina, e posicionada no centro da célula. Sua parte côncava é uma calota esférica como mostra a figura 1. Entre a calota e a parede da célula existe uma distância de 0,1cm, permitindo a passagem de fluido. Este dispositivo tem como finalidade manter estacionária a posição da fase orgânica.

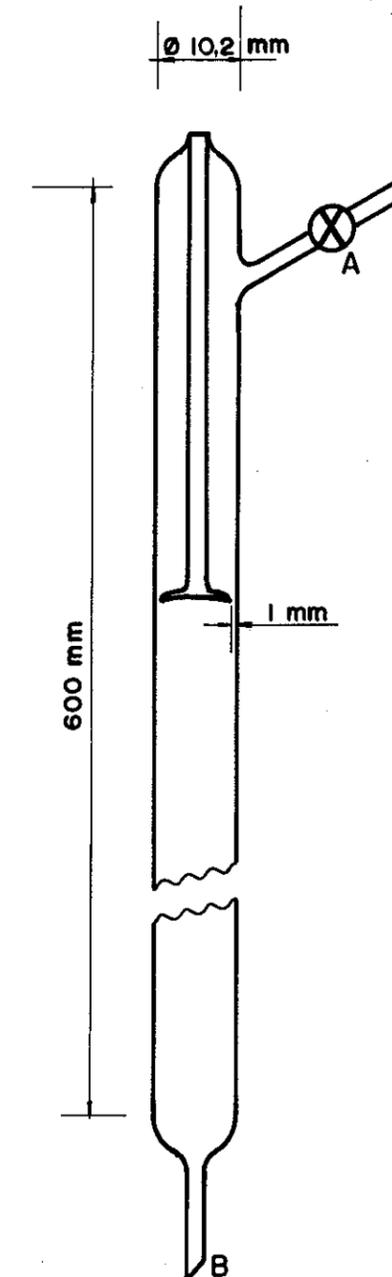


Fig. 1 - Esquema da célula.

A operação se inicia pré-saturando a fase orgânica com água. Em seguida inverte-se a posição da célula (colocando-se a saída B na parte superior) e abre-se a válvula A deixando a água circular, por algum tempo, até a eliminação completa de bolhas de ar, fecha-se então a válvula A e retira-se, com uma seringa, um volume de água, até que o menisco desça aproximada-

mente dez diâmetros da célula. Ainda com o auxílio de uma seringa, toma-se a fase orgânica pré-saturada com água, e completa-se o volume da célula. A seguir volta-se a célula para sua posição original (saída B para baixo) escolhendo-se antes uma posição inclinada para que a velocidade de subida da gota seja lenta e o acoplamento com a calota esférica seja suave. Estando a gota acoplada e a célula na vertical, seleciona-se a vazão pela abertura da válvula A. Espera-se por um minuto a entrada em regime.

A experiência consiste em anotar o comprimento inicial da gota, L_0 , e o instante inicial da contagem dos tempos, t_0 .

A seguir, em intervalos regulares ou arbitrários anotar L e t . Os valores de L e t deverão ser tomados até o momento em que a gota diminuir cerca de 10% em seu valor inicial, L_0 . Valores maiores implicam em perdas das hipóteses a serem formuladas no tratamento do problema.

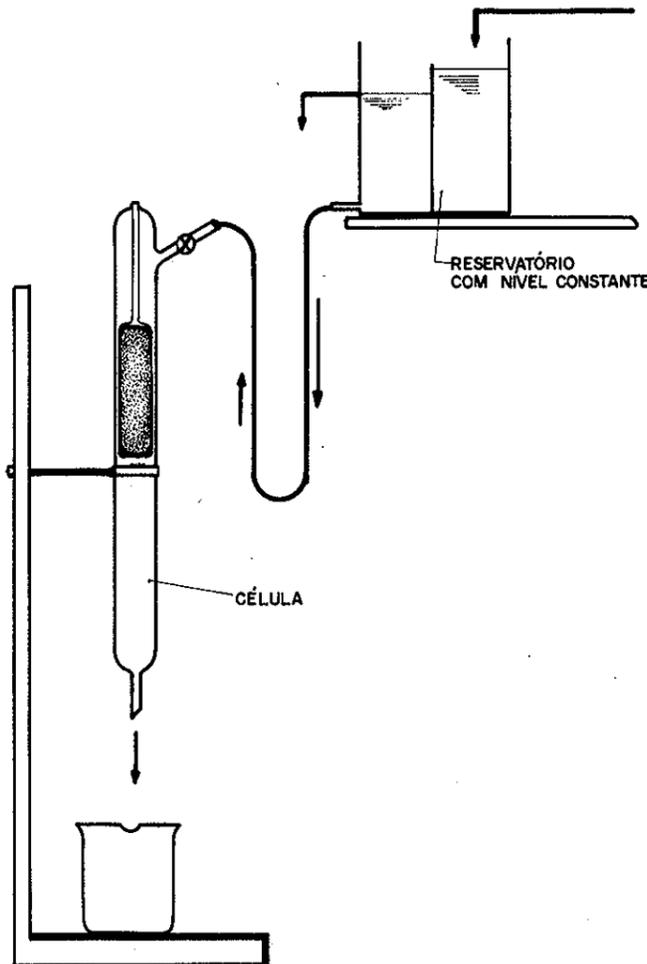


Fig. 2 — Esquema geral da aparelhagem.

A figura 2 mostra um esquema geral do equipamento.

Termodinamicamente a gota deverá se manter sempre saturada o que implica que a saída de uma massa Δm_i do componente orgânico implica na saída de uma massa $\Delta m_a = r(\Delta m_i)$ de água de maneira que a densidade da solução, ρ , e a concentração do componente i , ρ_i , sejam constantes no interior da gota, onde

$$r = \frac{\rho - \rho_i}{\rho_i} \quad (4)$$

Se L é o comprimento da gota num instante t , o volume da gota será $V = AL$ neste instante, onde A é aproximadamente a área da seção reta da célula. Assim, se R é o raio da célula, temos:

$$\frac{dV}{dt} = \pi R^2 \frac{dL}{dt} \quad (5)$$

mas

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{m_i + m_a}{\rho} = \frac{m_i (1 + r)}{\rho} \quad (6)$$

e portanto

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(1 + r)}{\rho} \frac{dm_i}{dt} \quad (7)$$

resultando da comparação entre as equações (7) e (5)

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{\rho \pi R^2}{(1 + r)} \frac{dL}{dt} \quad (8)$$

Se A_t é a área total de troca de massa, a densidade do fluxo médio será

$$\phi_i = - \frac{1}{A_t} \frac{dm_i}{dt} \quad (9)$$

onde o sinal negativo foi introduzido para tornar a densidade de fluxo um número positivo como considerado anteriormente.

Tendo-se em conta que a gota tem um comprimento muito maior que o seu raio podemos calcular como área total apenas a superfície lateral da gota. Assim

$$A_t = 2\pi RL \quad (10)$$

Combinando as equações (8), (9) e (10) sai

$$\phi_i = - \frac{\rho R}{2(1 + r)} \frac{d \ln L}{dt} \quad (11)$$

Usando a definição de K_i , equação (3), sai

$$K_{i\rho} = - \frac{\rho}{(\rho_{is} - \rho_{ir})} \frac{R}{2(1 + r)} \frac{d \ln L}{dt} \quad (12)$$

Em nosso caso, sistema binário a baixa pressão e baixa temperatura a equação (2) é simplesmente

$$\rho_{is} = \alpha \rho_i \quad (13)$$

onde α é uma constante obtida por estudos de equilíbrio de fases.

E temos, finalmente

$$K_{i\rho} = - \frac{\rho R}{2(\alpha \rho_i - \rho_{ir}) (1 + r)} \frac{d \ln L}{dt} \quad (14)$$

Supondo $K_{i\rho}$ constante e integrando à partir da condição inicial

$$t=0 \rightarrow L=L_0$$

temos

$$-\ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \frac{K}{\frac{\rho R}{2(\alpha\rho_i - \rho_{ir})(1+r)}} \cdot t \quad (15)$$

A equação (15) mostra uma linearidade entre $[-\ln(\frac{L}{L_0})]$ e o tempo. O coeficiente angular desta reta pode ser obtido do gráfico dos dados experimentais de L e t.

Obtido graficamente este coeficiente angular, que denotaremos β , obtêm-se $K_{i\rho}$ pela relação

$$K_{i\rho} = \beta \left[\frac{\rho R}{2(\alpha\rho_i - \rho_{ir})(1+r)} \right] \quad (16)$$

4. OUTRAS CONSIDERAÇÕES

A literatura apresenta correlações para a predição de valores do coeficiente de transferência de massa. Estas correlações, para sistemas binários, com taxas moderadas de transferência, apresentam-se na forma:

$$Sh = f(Re, Sc \text{ e geometria}) \quad (17)$$

onde

- Sh : número de Sherwood
- Re : número de Reynolds
- Sc : número de Schmidt

O número de Sherwood é uma medida da importância relativa dos processos de transferência de massa. Basicamente se expressa pela razão entre a resistência ao transporte por convecção e a resistência ao transporte por difusão.

Usando as nossas definições de densidade de fluxo e concentrações sai

$$Sh = \frac{K_p L^*}{D_{AB}} \text{ (adimensional)} \quad (18)$$

onde

- K_p : coeficiente de transferência de massa (LT^{-1})
- L^* : dimensão característica de comprimento (L)
- D_{AB} : coeficiente de difusão (L^2T^{-1})

O número de Reynolds é uma medida da importância relativa dos processos de transferência de quantidade de movimento. Basicamente se expressa pela razão entre a resistência ao transporte por ação de forças de inércia e a resistência ao transporte por ação de forças viscosas.

$$Re = \frac{\rho v^* L^*}{\mu} \text{ (adimensional)} \quad (19)$$

onde

- ρ : densidade do fluido (ML^{-3})
- v^* : velocidade de referência do fluido (LT^{-1})
- μ : viscosidade do fluido ($ML^{-1}T^{-1}$)

O número de Schmidt é uma medida da importância relativa entre o processo difusivo de transferência de quantidade de movimento e o processo difusivo de transferência de massa. Basicamente se expressa pela razão

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \text{ (adimensional)} \quad (20)$$

Assim a equação (16) se torna

$$Sh = f\left(\frac{\rho v^* L^*}{\mu}, \frac{\mu}{\rho D_{AB}}\right) \quad (21)$$

Vale ressaltar que embora a equação (21) esteja escrita em termos de adimensionais ela só pode ser aplicada a sistemas com geometrias similares àquela em que foi elaborada, à partir de dados experimentais.

5. SUGESTÕES PARA AS ATIVIDADES DOS ALUNOS

Para um melhor aproveitamento do assunto sugerimos as seguintes etapas:

- a) distribuição dos alunos em equipes.
- b) escolha de uma fase orgânica para cada equipe (a outra fase será sempre água).
- c) cada aluno de uma equipe seleciona uma vazão e determina K_p .
- d) cada equipe repassa às outras seus resultados.
- e) cada equipe, de posse destes resultados, apresenta uma correlação (equação 20).

A título de exemplo apresentamos o resultado de uma experiência típica.

Sistema água-metil isobutil cetona

Propriedades do sistema (Referência 2)

- ρ : 0,820 $g\ cm^{-3}$
- ρ_i : 0,780 $g\ cm^{-3}$ (saturação em água – fase orgânica)
- g_i^* : 0,0207 $g\ cm^{-3}$ (saturação em água – fase aquosa)
- D_{ia} : $0,77 \cdot 10^{-5}\ cm^2\ s^{-1}$ (diluição infinita)

Destes dados temos

$$r = \frac{\rho - \rho_i}{\rho_i} = 0,051$$

$$\alpha = \frac{\rho_i^*}{\rho_i} = 0,027$$

VAZÃO = 2,04 $cm^3\ s^{-1}$		
L (cm)	t (s)	$-\ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$
6,6	0	0,000
6,5	60	0,015
6,4	120	0,031
6,3	180	0,047
6,2	240	0,063
6,1	300	0,079
6,0	360	0,095

TABELA 1 – Dados experimentais de L x t

Os dados experimentais estão mostrados na figura 3 e são inteiramente representativos da equação (15).

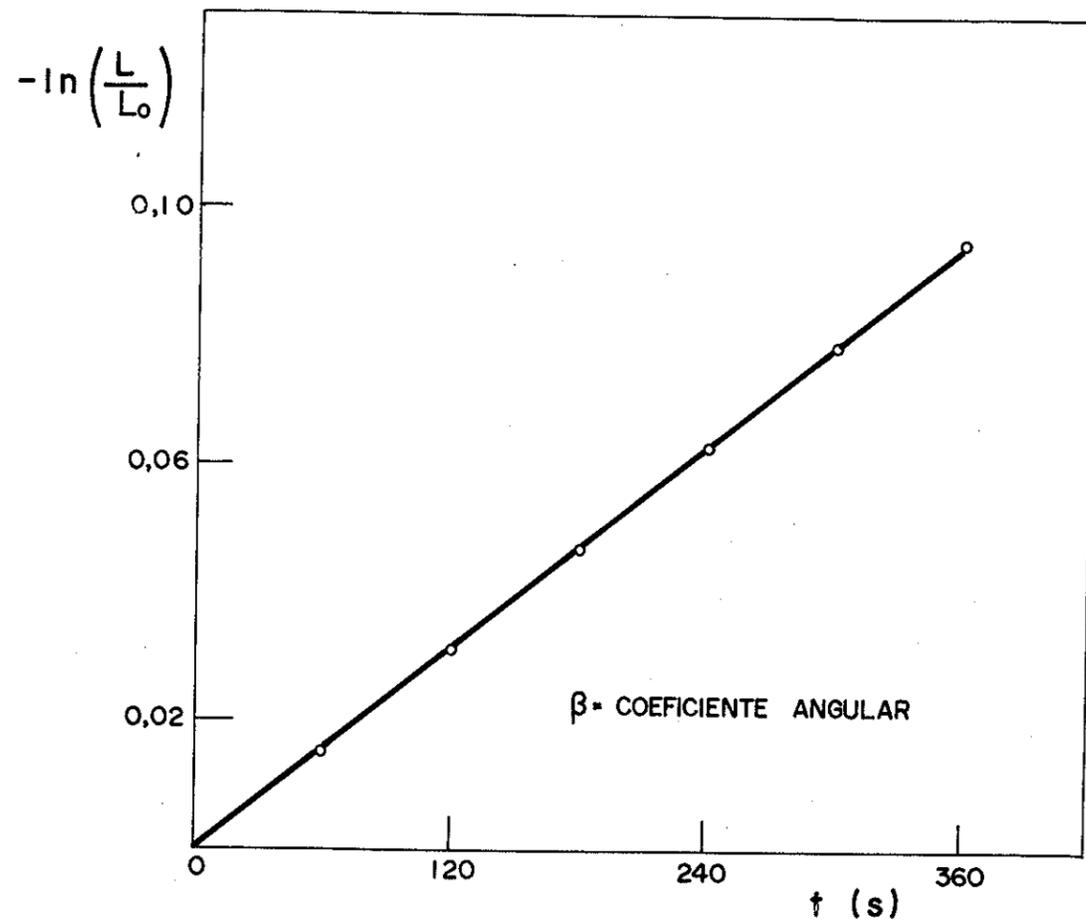


Fig. 3 - Obtenção gráfica de β .

Desta figura tiraremos

$$\beta = \frac{0 - 0,095}{0 - 360} = 2,639 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

e sai

$$K_{i\rho} = 2,639 \cdot 10^{-4} \left\{ \frac{(0,820)(0,70)}{2[(0,027)(0,780) - 0](1 + 0,051)} \right\}$$

de onde

$$K_{i\rho} = 3,48 \cdot 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$$

Nestes cálculos admitimos $\rho_{ir} = 0$

Para o cálculo de L^* e v^* , respectivamente comprimento e velocidade característicos adotaremos

$$L^* = \frac{V}{A_t} = \frac{\text{volume da gota}}{\text{Área total de troca}}$$

$$v^* = \frac{Q}{A} = \frac{\text{vazão}}{\text{Área da seção da célula}}$$

e temos

$$L^* = \frac{\pi R^2 L}{2\pi R L} = \frac{R}{2} = \frac{0,70}{2} = 0,35 \text{ cm}$$

$$v^* = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{2,04}{1,539} = 1,33 \text{ cm s}^{-1}$$

e sai

$$Sh = \frac{K_{i\rho} L^*}{D_{ia}} = \frac{(3,48 \cdot 10^{-3})(0,35)}{0,77 \cdot 10^{-5}} = 158,1$$

$$Re = \frac{\rho v^* L^*}{\mu} = \frac{(0,820)(1,33)(0,35)}{10^{-2}} = 38,2$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{ia}} = \frac{10^{-2}}{(0,820)(0,77 \cdot 10^{-5})} = 158,37$$

6. CONCLUSÃO

O objetivo que procuramos foi plenamente alcançado, qual seja, dotar o laboratório de fenômenos de transporte de um equipamento didático simples, de fácil operação, porém eficiente para a determinação do coeficiente de difusão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - GUBULIN, J.C.; FREIRE, J.T. & TOBINAGA, S.. *Rev. Ensino Eng.*, 2: 35-42, 1982.
- [2] - BAIRD, M.H.I. & HO, M.K.. *The Canadian J. of Chem. Eng.*, 57: 467-475, 1979.