



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

---

# LABORATÓRIO DE ENGENHARIA QUÍMICA 2

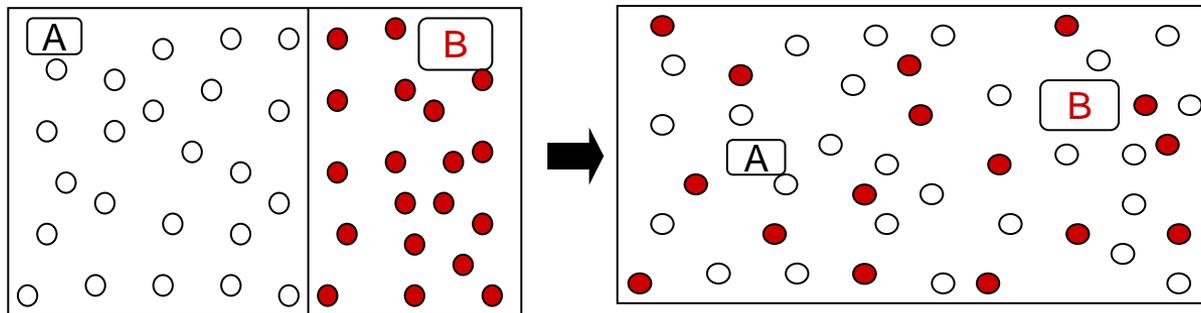
**Prof. Gerônimo Virgínio Tagliaferro**

Aula do experimento 3

# EXPERIMENTO 3: DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO EM MISTURAS GASOSAS

## INTRODUÇÃO

Para ilustrar um exemplo de difusão entre dois gases, considere uma câmara na qual duas espécies de gás, à mesma temperatura e pressão encontram-se separadas por uma partição. Se a partição for removida, as espécies serão transportadas por difusão. Uma maior concentração significa mais moléculas por unidade de volume e a concentração da espécie A decresce com o aumento de  $x$ . Uma vez que a difusão de massa é na direção do decréscimo de concentração, ocorre o transporte líquido da espécie E para a direita e da espécie B para a esquerda. Após um tempo suficiente, concentrações uniformes de B e A são alcançadas e não há transporte líquido das espécies B e A através do plano imaginário.

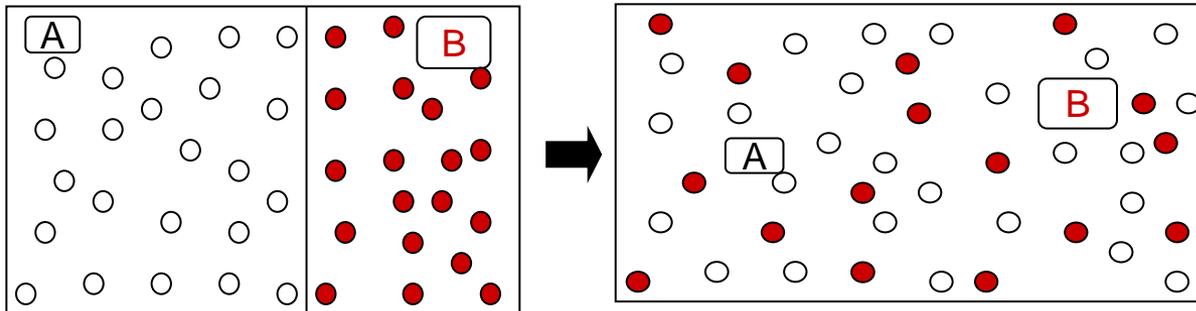


# INTRODUÇÃO

A difusão de massa pode ocorrer em líquidos, sólidos e gases. Entretanto, uma vez que a transferência de massa é altamente influenciada pelo espaçamento molecular, a difusão ocorre mais facilmente em gases do que em líquidos e mais facilmente em líquidos do que em sólidos. Em outras palavras, a magnitude da difusividade mássica para líquidos ou gases em sólidos é menor do que a difusividade mássica para gases em líquidos. Estas diferenças são devido à mobilidade das moléculas.

De acordo com a Lei de Fick:

$$J_{A,z} = -D_{A,B} \frac{\partial C_A}{\partial z}$$



**DIFUSIVIDADE MÁSSICA:** Constante de proporcionalidade entre o fluxo de massa e o gradiente de concentração. Ela representa o grau de “rapidez” com que a difusão ocorre.

{	LÍQUIDOS	$(10^{-6} - 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s})$
	SÓLIDOS	$(10^{-9} - 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s})$
	GASES	$(5 \cdot 10^{-1} - 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s})$

*GASES* > *LÍQUIDOS* > *SÓLIDOS*

DIFUSIVIDADE DEPENDE DA TEMPERATURA  
E CONCENTRAÇÃO

DIFUSIVIDADE DEPENDE  
ESSENCIALMENTE DA PRESSÃO.

**VALORES DOS COEFICIENTES DE DIFUSIVIDADE DE ALGUNS GASES EM ÁGUA  
A 20°C:**

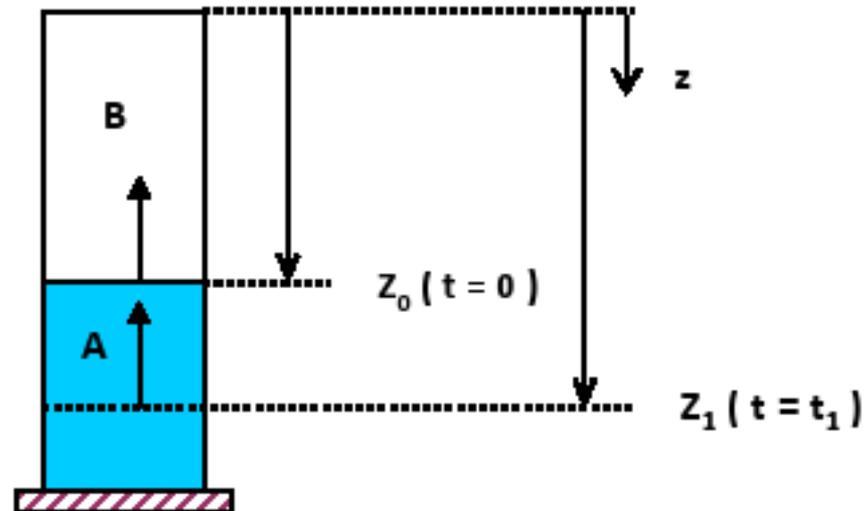
<i>GÁS</i>	$D \cdot 10^9 \left( \frac{m^2}{s} \right)$
AMÔNIA	1,8
DIÓXIDO DE CARBONO	1,8
HIDROGÊNIO	5,3
NITROGÊNIO	1,9
OXIGÊNIO	2,1

**VALORES DOS COEFICIENTES DE DIFUSIVIDADE DE ALGUNS GASES E VAPORES EM AR  
À 20°C E 1 atm:**

<i>GÁS</i>	$D \cdot 10^6 \left( \frac{m^2}{s} \right)$
AMÔNIA	17,0
BENZENO	7,7
DIÓXIDO DE CARBONO	13,8
ÁLCOOL ETÍLICO	10,2
HIDROGÊNIO	61,1
METANOL	13,3
NITROGÊNIO	13,2
OXIGÊNIO	17,8
DIÓXIDO DE ENXÔFRE	10,3
VAPOR DE ÁGUA	21,9

A figura ilustra um capilar semipreenchido por líquido puro volátil A. Supondo que sobre esse líquido exista um filme gasoso estagnado B, deseja-se avaliar o coeficiente de difusão do vapor de A nessa película. Após um intervalo de tempo considerável, nota-se a variação do nível do líquido, a partir do topo do capilar desde  $Z_0$  ( $t = 0$ ) até  $Z_1$  ( $t = t_1$ ). A equação que descreve o fluxo mássico de um soluto “A” desde  $Z_0$  até  $Z_1$  em um filme de gás estagnado “B” em um tubo capilar de dimensões infinitas é:

$$N_{A,z} = - \frac{C \cdot D_{A,B}}{1 - y_A} \frac{dy_A}{dz}$$



O fluxo de A na direção oposta de z é:

$$N_{A,Z} = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A (N_{A,Z} + N_{B,Z})$$

Considerando o fluxo de B estagnado, temos:

$$N_{B,Z} = 0$$

$$N_{A,Z} = -\frac{CD_{AB}}{(1 - y_A)} \frac{dy_A}{dz}$$

$$N_{A,Z} \int_{z_0}^{z_1} dz = -CD_{AB} \int_{y_{A,S}}^{y_{A,t}} \frac{dy_A}{1 - y_A}$$

$$N_{A,Z} (z_1 - z_0) = CD_{AB} [\text{Ln}(1 - y_A)]_{y_{A,S}}^{y_{A,t}}$$

$$N_{A,Z} (z_1 - z_0) = CD_{AB} [\text{Ln}(1 - y_{A,t}) - \text{Ln}(1 - y_{A,S})]$$

$$N_{A,z} = \frac{C \cdot D_{A,B}}{Z_1 - Z_0} \text{Ln} \left( \frac{1 - y_{A,t}}{1 - y_{A,S}} \right) \quad (1)$$

$Z_0$  = altura entre o topo da coluna e a superfície do líquido antes de iniciar o processo de difusão de “A” em “B” (  $t = 0$  );

$Z_1$  = altura entre o topo da coluna e a superfície do líquido após iniciar o processo de difusão de “A” em “B” (  $t = \text{qualquer}$  );

$y_{A,t}$  = fração molar de “A” no topo do tubo;

$y_{A,S}$  = fração molar de “A” na superfície do líquido;

$C$  = concentração molar global na coluna gasosa;

$D_{A,B}$  = coeficiente de difusão de “A” em “B”.

Em muitas operações de transferência de massa, uma das condições de contorno pode mover-se com o tempo. O modelo pseudo-estacionário pode ser usado quando a difusão varia em pequena quantidade sobre um longo período de tempo. Assim, o fluxo molar  $N_{A,z}$  em regime pseudo-estacionário será dado por:

$$N_{A,z} = C_A \cdot v_A = C_A \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{\rho_A}{M_A} \cdot \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

Substituindo a equação ( 2 ) na equação ( 1 ) para regime pseudo-estacionário, temos:

$$\frac{\rho_A}{M_A} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{C \cdot D_{A,B}}{Z_1 - Z_0} \text{Ln} \left( \frac{1 - y_{A,t}}{1 - y_{A,S}} \right) \quad (3)$$

$\rho_A$  = concentração mássica de “A”;

$M_A$  = massa molecular de “A”.

Determine o tempo final de difusão de “A” em “B” (ou num instante qualquer) e o coeficiente de difusão  $D_{A,B}$  para um determinado instante qualquer.

$$\left( \frac{\rho_A}{M_A} \right) \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{C \cdot D_{A,B}}{Z} \text{Ln} \left( \frac{1 - y_{A,t}}{1 - y_{A,S}} \right)$$

$$\int_0^t dt = \frac{\rho_A}{M_A \cdot C \cdot D_{A,B}} \frac{1}{\text{Ln} \left( \frac{1 - y_{A,t}}{1 - y_{A,S}} \right)} \int_{Z_0}^{Z_1} z \cdot dz$$

$$t = \frac{\rho_A}{M_A \cdot C \cdot D_{A,B}} \frac{1}{\text{Ln}\left(\frac{1-y_{A,t}}{1-y_{A,S}}\right)} \left[ \frac{z^2}{2} \right]_{z_0}^{z_1}$$

$$t = \frac{\rho_A}{M_A \cdot C \cdot D_{A,B}} \frac{1}{\text{Ln}\left(\frac{1-y_{A,t}}{1-y_{A,S}}\right)} \left[ \frac{z_1^2}{2} - \frac{z_0^2}{2} \right]$$

$$t = \frac{\rho_A}{M_A \cdot C \cdot D_{A,B}} \frac{1}{\text{Ln}\left(\frac{1-y_{A,t}}{1-y_{A,S}}\right)} \left[ \frac{z_1^2 - z_0^2}{2} \right] \quad (4)$$

PARA MISTURAS GASOSAS:

$$C = \frac{P}{R \cdot T}$$

$$\text{Ln}\left(\frac{1-y_{A,t}}{1-y_{A,S}}\right) = \text{Ln}\left(1 - \frac{P_v}{P}\right)$$

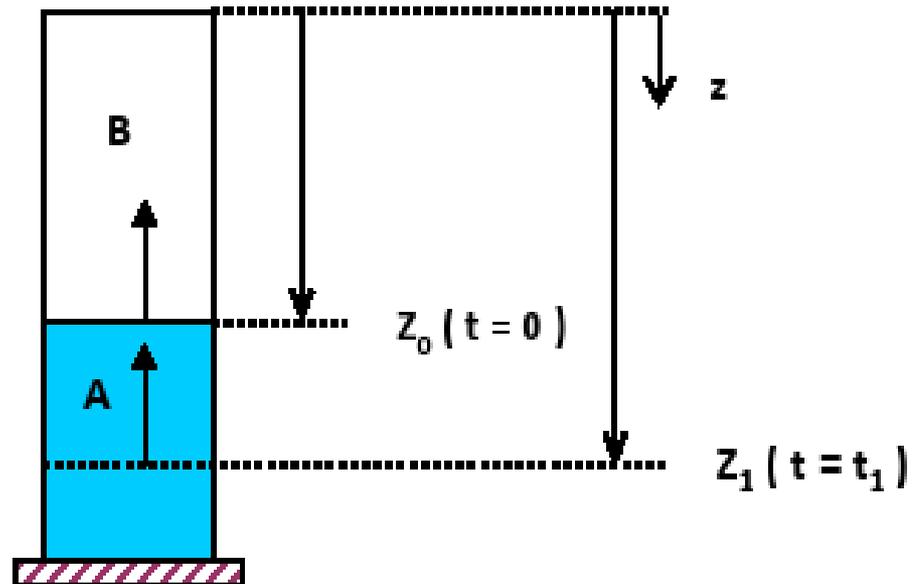
$$L(t)^2 = L(t_0)^2 - \frac{2 \cdot M_A \cdot P}{p_{liq} \cdot R \cdot T} \cdot D_{AB} \cdot \ln\left[1 - \frac{P_v}{P}\right] (t - t_0)$$

## NO EXPERIMENTO:

**Objetivo:** Determinar experimentalmente o coeficiente de difusão em misturas gasosas, em condições de regime pseudo-estacionário, onde um dos constituintes procede de uma substância líquida pura em evaporação.

## Materiais:

- Célula de Stefan ;
- Termômetro;
- Cronômetro;
- Régua;
- Dietil – éter.



## **Procedimento Experimental:**

- 1) Preenchimento da célula, através de uma seringa hipodérmica, com o líquido cujo vapor é objetivo de difusão de ar estagnado;
- 2) Após um tempo de espera, para que o sistema atinja o regime pseudo estacionário, inicia-se a contagem do tempo anotando-se, periodicamente, a posição  $L(t)$ ;
- 3) A cada medida de  $L(t)$  mede-se  $T$  e  $P$ ;
- 4) Tratamento dos dados para a obtenção do coeficiente de difusão  $D_{ab}$ .