

ARTIGOS

CÉLULA A DIAFRAGMA POROSO PARA A DETERMINAÇÃO DO  
COEFICIENTE DE DIFUSÃO

J.C. Gubulin\*  
J.T. Freire\*  
S. Tobinaga\*

GUBULIN, J. C. e outros. Célula a diafragma poroso para a determinação do coeficiente de difusão. *Rev. Ensino Eng.*, S. Paulo, 2:35-42, 2ª sem. 1982.

Na descrição da cinética da transferência de massa, o coeficiente de difusão é um dos parâmetros mais importantes. Dentre os inúmeros métodos disponíveis para a sua determinação, a técnica da célula a diafragma poroso é uma das mais facilmente utilizáveis. Neste trabalho é apresentada uma versão simplificada deste equipamento com o objetivo de utilizá-lo em laboratório de ensino de fenômenos de transporte.

Célula a diafragma poroso. Coeficiente de difusão. Transferência de massa. Fenômenos de transporte. Difusão.

---

GUBULIN, J. C. and others. Porous diaphragm cell to determine the diffusion coefficient. *Rev. Ensino Eng.*, S. Paulo, 2:35-42, 2. sem. 1982.

The diffusion coefficient is one of the best important parameters to describe the mass transport kinetic. Among others, the porous diaphragm cell is one of the easiest equipment to determine the diffusion coefficient. In this work we present a simplified porous diaphragm cell that could be used in an transport phenomena laboratory for undergraduate chemical engineers.

Porous diaphragm cell. Diffusion coefficient. Mass transport. Transport phenomena. Diffusion.

## 1. INTRODUÇÃO

No projeto e dimensionamento de muitos equipamentos é necessário conhecer e caracterizar os mecanismos de transferência de massa. Inúmeros são os parâmetros envolvidos na descrição destes mecanismos. Uns estão diretamente ligados ao comportamento hidrodinâmico do fenômeno enquanto que outros às propriedades físico-químicas dos constituintes presentes. Dentre estes últimos o coeficiente de difusão é o mais significativo pois o seu valor determina a rapidez da etapa difusiva da cinética de transferência.

Face à multiplicidade dos sistemas químicos nem sempre é possível encontrar na literatura dados do coeficiente de difusão, para um particular sistema de interesse. Por outro lado não existe ainda uma correlação segura para a previsão do valor deste parâmetro, sobretudo no tocante a líquidos. Fica clara, portanto, a necessidade de se utilizar a experimentação.

Com o objetivo de apresentar ao aluno o problema, estamos explorando didaticamente o fenômeno, apresentando uma versão simplificada da célula a diafragma poroso.

Dentre os métodos disponíveis, parece-nos que a célula a diafragma poroso é a mais indicada, pela simplicidade de seus dispositivos, facilidade de manipulação e rapidez na obtenção dos dados experimentais. Melhores resultados só são obtidos com técnicas altamente sofisticadas e custosas como, por exemplo, os métodos interferométricos.

---

\* Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos.

## 2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No caso da difusão binária unidirecional de um sistema contendo as espécies químicas A e B a equação de fluxo, para o componente A é dada por:

$$N_A = -CD_{AB} \frac{dX_A}{dy} + X_A(N_A + N_B) \quad (1)$$

Uma equação análoga é escrita para o componente B, onde

$N_A, N_B$  : fluxo molar da espécie A e B respectivamente, medidos com relação a eixos fixos [ $\text{moles} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$X_A$  : fração molar da espécie A

$C$  : concentração total da solução [ $\text{moles} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$y$  : coordenada espacial [m]

$D_{AB}$  : coeficiente de difusão [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Na equação (1) temos

$X_A(N_A + N_B)$  : fluxo devido ao movimento global do fluido

$-CD_{AB} \frac{dX_A}{dy}$  : fluxo resultante da difusão molecular

Considerando o fluido estagnado e sem variação local do volume molar temos:

$$X_A(N_A + N_B) = 0 \quad (2)$$

e resulta para a equação (1)

$$N_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dy} \quad (3)$$

onde

$C_A$  : concentração molar da espécie A [ $\text{moles de A} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

Relação conhecida como primeira lei de FICK<sup>1</sup>.

## 3. CÉLULA A DIAFRAGMA POROSO

Este método foi introduzido por NORTHROP e ANSON<sup>2</sup>.

A idéia fundamental é de minimizar os efeitos de vibração, confinando a difusão nos poros de um diafragma poroso (vidro sinterizado). A difusão ocorre então no interior do diafragma, considerado como sendo uma multiplicidade de poros de comprimento  $L$  e de área total  $A$ , entre dois compartimentos preenchidos com diferentes concentrações.

Se os compartimentos são suficientemente grandes, comparados com o volume de poros do diafragma, as concentrações em cada um deles varia, lentamente, de sorte que o perfil de concentrações no interior do diafragma poroso é praticamente constante, na duração da experiência.

Os compartimentos devem ser continuamente agitados, para que se mantenha uniformidade de concentrações. O esquema clássico da célula é mostrada na figura 1.

O diâmetro dos poros do diafragma deve ser suficientemente pequeno para que a difusão não seja perturbada pela agitação e suficientemente grande, com relação às dimensões das

moléculas, para que o transporte ocorra por difusão molecular. Poros da ordem de 5 microns atendem perfeitamente a estas condições.

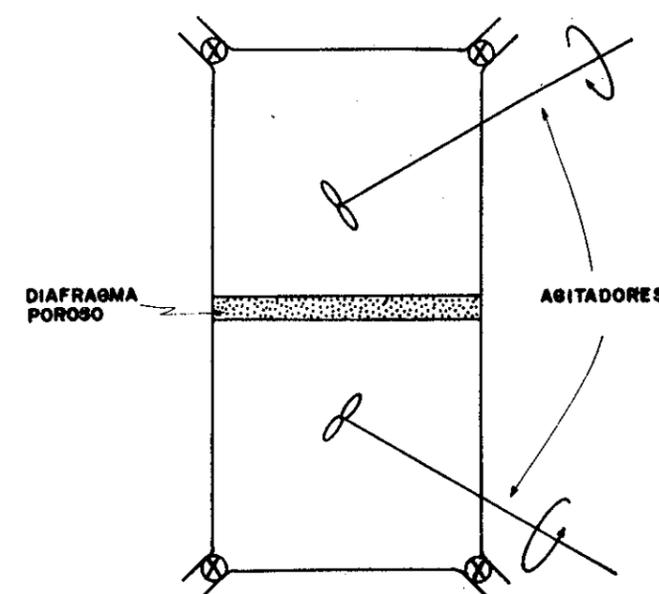


Fig. 1 - Esquema da célula a diafragma poroso.

### 3.1 Cálculo do Coeficiente de Difusão

Sejam  $V_1$  e  $V_2$  os volumes dos compartimentos da célula e  $C_1$  e  $C_2$  as concentrações respectivas (tomando como referência a espécie química A).

A variação de volume no compartimento 1 no tempo  $dt$  é dada por:

$$V_1 \frac{dC_1}{dt}$$

igual ao fluxo de massa que cruzou o diafragma poroso indo em direção ao compartimento 2. Este fluxo é dado por:

$$-D_{AB} A \frac{dC}{dy}$$

Por continuidade este será o fluxo penetrando no compartimento 2 onde a variação de massa no tempo  $dt$  será:

$$-V_2 \frac{dC_2}{dt}$$

e temos:

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} + D_{AB} A \frac{dC}{dy} = 0 \quad (4)$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} - D_{AB} A \frac{dC}{dy} = 0 \quad (5)$$

Façamos agora as seguintes hipóteses:

- A cada instante, o fluxo difusional é constante em todos os níveis do diafragma (regime quase-estacionário);
- O coeficiente de difusão é constante e igual a  $D$ ,

então

$$\frac{dC}{dy} = \frac{C_1 - C_2}{L} \quad (6)$$

e resulta

$$V_1 dC_1 + D \frac{A}{L} (C_1 - C_2) dt = 0 \quad (7)$$

$$V_2 dC_2 - D \frac{A}{L} (C_1 - C_2) dt = 0 \quad (8)$$

rearranjando temos

$$\frac{dC_1}{C_1 - C_2} + D \frac{A}{L} \frac{1}{V_1} dt = 0 \quad (9)$$

$$\frac{dC_1}{C_1 - C_2} - D \frac{A}{L} \frac{1}{V_2} dt = 0 \quad (10)$$

subtraindo membro a membro estas duas últimas equações temos:

$$\frac{d(C_1 - C_2)}{C_1 - C_2} + D \frac{A}{L} \left( \frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) dt = 0 \quad (11)$$

agrupando os termos geométricos em uma constante obtemos:

$$\beta = \frac{A}{L} \left( \frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) \quad (12)$$

em que  $\beta$  é denominado "constante da célula".

Assim, a equação (11) resulta

$$d \ln (C_1 - C_2) = -\beta D dt \quad (13)$$

Integrando a equação (13) entre o instante inicial  $t = 0$  em que as concentrações são  $C_{10}$  e  $C_{20}$  respectivamente e o instante final  $t$  em que as concentrações são  $C_{1f}$  e  $C_{2f}$  respectivamente, temos:

$$\ln \left[ \frac{C_{1f} - C_{2f}}{C_{10} - C_{20}} \right] = -\beta D t \quad (14)$$

Para a aplicação desta equação deve-se zelar para que  $C_{10}$  e  $C_{20}$  sejam próximas de  $C_{1f}$  e  $C_{2f}$  garantindo assim a hipótese de regime quase-estacionário.

### 3.2 Dispositivo Experimental

Na figura 2, é mostrado um esquema da célula que construímos. Sua principal característica é a utilização de uma membrana porosa em substituição ao meio poroso de vidro sinterizado. Nas células convencionais esta substituição foi feita por filtros "millipore" tendo excelente desempenho e boa resistência mecânica. A grande dificuldade técnica na construção das células está na fabricação e acoplamento dos agitadores, tarefa nem sempre executada satisfatoriamente.

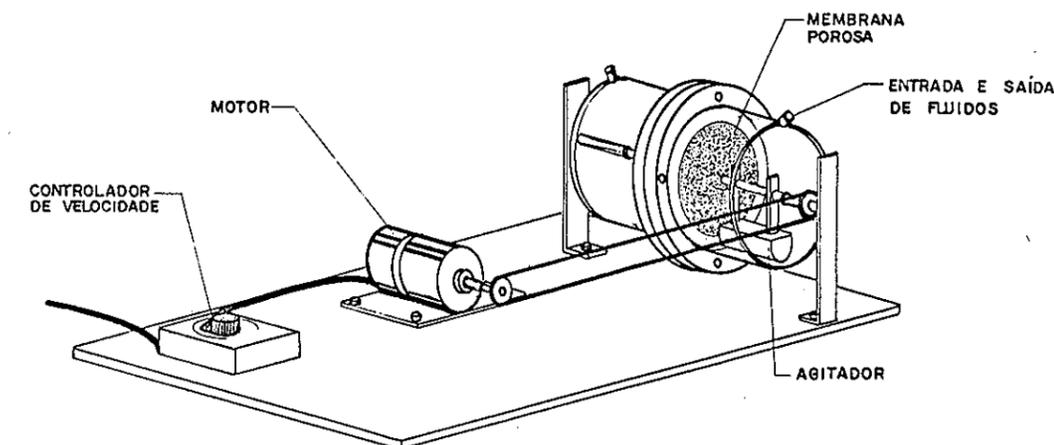


Fig. 2 - Célula a diafragma poroso.

Na célula apresentada, a agitação é feita através de pêndulos não existindo assim a necessidade da introdução de agitadores, pelas paredes da célula.

A célula é construída em acrílico tendo cada um dos compartimentos um semi-eixo onde estão alocados os pêndulos. Estes semi-eixos são solidários à célula e atravessam a sua parede externa, para a fixação em dois ponteiros, permitindo sua rotação. Externamente à célula, em um dos semi-eixos, existe uma polia que recebe a transmissão de movimento vinda de um motor. Assim, imprimindo-se à célula um movimento de rotação se tem intensa agitação nos compartimentos, pela ação conjugada dos pêndulos, que permanecem na vertical. Os pêndulos são de acrílico revestindo um bloco de chumbo na parte inferior (em sua nova versão os pêndulos serão construídos em aço inox e a célula será termostatizada).

### 3.3 Operação do Dispositivo

Para a determinação do coeficiente de difusão necessita-se do conhecimento das concentrações iniciais em cada compartimento, da duração da experiência e das concentrações finais.

As operações são as seguintes:

- preparação e degaseificação das soluções  $C_{10}$  e  $C_{20}$ ;
- posicionamento da célula na horizontal e preenchimento de um dos compartimentos;
- posicionamento da célula na vertical deixando em baixo o compartimento já preenchido;
- retirada, com seringa, da solução que possivelmente tenha passado para o compartimento superior, quando do preenchimento do inferior;
- preenchimento do compartimento superior;
- ajuste da célula no suporte;
- acionamento do motor e do início da contagem do tempo;

- h) ao término do tempo escolhido, posicionamento da célula na vertical e tomada de amostra suficiente para análise (coleta-se do compartimento superior);
- i) inversão da célula na vertical e retirada de amostra para análise.

A análise das concentrações vai depender essencialmente, das propriedades físico-químicas do sistema estudado e das condições favoráveis de que se dispõe em termos de equipamento. Neste trabalho, dois foram os sistemas binários estudados:

- I - Cloreto de potássio - água
- II - Cloreto de sódio - água

As concentrações em ambos os casos foram determinadas por condutimetria. A figura 3, mostra as curvas de calibração para a faixa de concentração do nosso interesse.

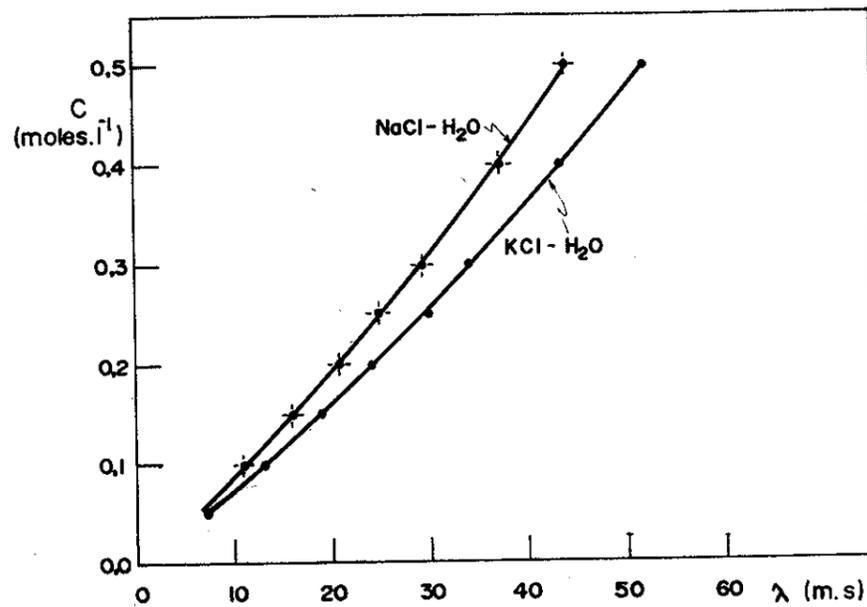


Fig. 3 - Curvas de calibração para os sistemas estudados.

### 3.4 Efeito da Camada Limite

A agitação nos compartimentos tem como função uniformizar a concentração, entretanto, a turbulência desenvolvida no seio do compartimento diminui nas proximidades das paredes da célula com a formação de uma camada limite, cuja espessura depende, basicamente, das propriedades físico-químicas do sistema, da geometria da célula e da intensidade da agitação promovida.

Nesta camada limite hidrodinâmica a transferência de massa se faz por difusão molecular. Assim, a camada limite formada nas vizinhanças do diafragma poroso terá como fator adverso um aumento do caminho difusional das espécies químicas.

Para se eliminar esta perturbação torna-se necessário selecionar a velocidade dos agitadores, no sentido de que a espessura da camada limite seja desprezível em comparação com aquela do diafragma poroso.

Para determinação da mínima rotação, por minuto, dos agitadores (da célula em nosso caso) satisfazendo as condições de dedução da equação (14) sugerimos o traçado do gráfico de  $-\beta D$  contra  $\omega$  cuja forma é mostrada na figura 4, onde se constata que, a partir de  $\omega_m$  se tem  $\beta$  praticamente constante, como previsto na dedução da equação (14).

A experiência descrita independe do valor do coeficiente de difusão, uma vez que o mesmo é considerado constante.

Para sistemas de soluções aquosas ou sistemas no qual a viscosidade difere pouco daquela da água, uma rotação de 300 ciclos por minuto satisfaz amplamente.

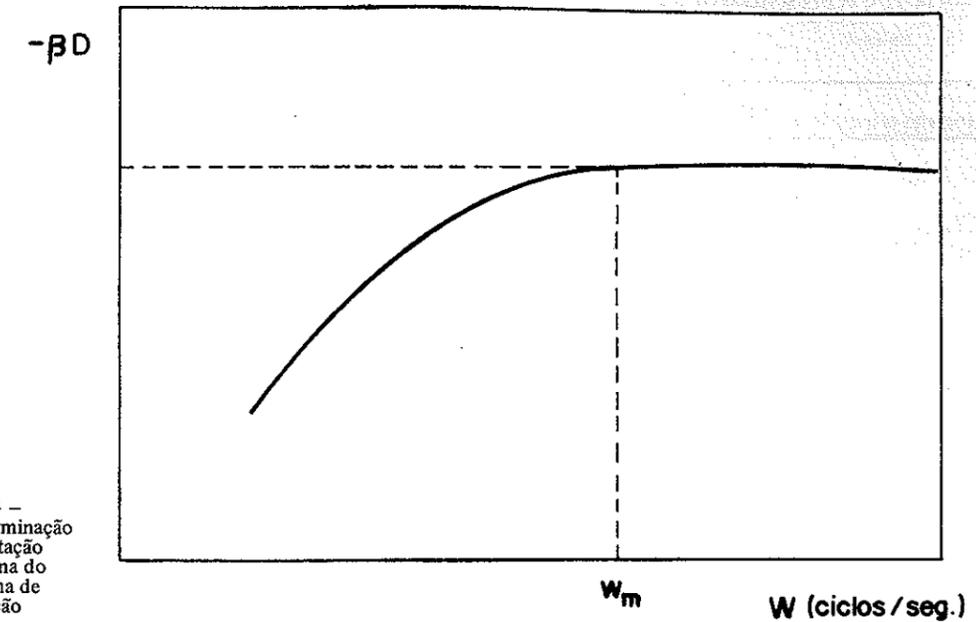


Fig. 4 - Determinação da rotação mínima do sistema de agitação

### 3.5 Determinação da Constante da Célula

A constante  $\beta$  é uma propriedade geométrica da célula, como definida pela equação (12) e pode ser determinada a partir de algum sistema químico para o qual se conhece o valor do coeficiente de difusão. Para o seu cálculo utiliza-se a equação:

$$\beta = -\frac{1}{Dt} \ln \left[ \frac{C_{1f} - C_{2f}}{C_{10} - C_{20}} \right] \quad (15)$$

Na determinação de  $\beta$  escolhemos o sistema cloreto de potássio - água a 25°C por ser um sistema bastante estudado. A figura 5, mostra os dados obtidos por WOOLF e TYLLEY<sup>3</sup>.

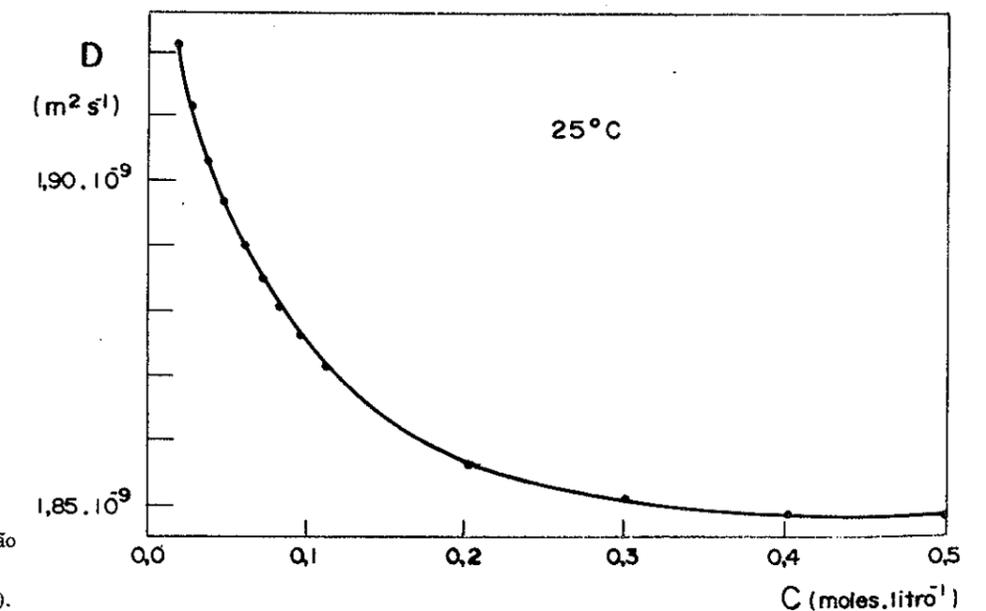


Fig. 5 - Variação do coeficiente de difusão em função da concentração para o sistema KCl-H₂O (3).

A tabela 1, é representativa das experiências realizadas para a determinação de  $\beta$ .

TABELA 1

SISTEMA CLORETO DE POTÁSSIO – ÁGUA					
$C_{10}$ ( $\frac{\text{moles}}{\text{litro}}$ )	$C_{20}$ ( $\frac{\text{moles}}{\text{litro}}$ )	$C_{1f}$ ( $\frac{\text{moles}}{\text{litro}}$ )	$C_{2f}$ ( $\frac{\text{moles}}{\text{litro}}$ )	D ( $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ )	t (h)
0,500	0,200	0,480	0,225	$1,85 \cdot 10^{-9}$	3
$\beta = 8,13 \cdot 10^3 \text{ m}^{-2}$					

### 3.6 Determinação do Coeficiente de Difusão

Finalmente, para verificar se a célula se comportava bem na obtenção de coeficientes de difusão tentamos prever seu valor para o sistema cloreto de sódio-água, para o qual conhecíamos o valor experimental a 25°C obtidos por FIRTH et al<sup>4</sup> e STOKES<sup>5</sup>.

A Tabela 2, é representativa das experiências realizadas para a determinação de D.

TABELA 2

SISTEMA CLORETO DE SÓDIO – ÁGUA					
$C_{10}$ ( $\frac{\text{moles}}{\text{litro}}$ )	$C_{20}$ ( $\frac{\text{moles}}{\text{litro}}$ )	$C_{1f}$ ( $\frac{\text{moles}}{\text{litro}}$ )	$C_{2f}$ ( $\frac{\text{moles}}{\text{litro}}$ )	$\beta$ ( $\text{m}^2$ )	t (h)
0,500	0,200	0,490	0,220	$8,13 \cdot 10^3$	3
$D = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$					

Tendo em vista que o valor experimental obtido por outros autores é  $D = 1,475 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  podemos concluir que nossos desvios são relativamente pequenos.

## 4. CONCLUSÃO

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

### Agradecimentos

Os autores externam a sua gratidão ao professor A. Cláudio Habert da COPPE/UFRJ pela construção da membrana porosa utilizada neste trabalho.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – BIRD R. B., STEWART W. E. e LIGHTFOOT E. N. *Fenômenos de transporte*. Editorial Reverté S/A, 1975.
- [2] – NORTHROP J. N. e ANSON M. L., *J. Gen. Physiol.*, 12, p. 543, (1928).
- [3] – WOOLF L. A. e TILLEY J. F., *J. Phys. Chem.*, 72, p. 1962, (1967).
- [4] – FIRTH J. G. e TYRREL H. J. V., *J. Chem. Soc.*, II, p. 2042, (1962).
- [5] – STOKES R. H., *J. Amer. Chem. Soc.*, 72, p. 2243, (1950).

## ARTIGOS

### CURSO DE METODOLOGIA DO ENSINO DE ENGENHARIA: UMA EXPERIÊNCIA EM DESENVOLVIMENTO

Tania Fischer\*  
Luiz P. Calôba\*\*

FISCHER, Tania & CALÔBA, Luiz P. Curso de metodologia do ensino de engenharia: uma experiência em desenvolvimento. *Rev. Ensino Eng.*, S. Paulo, 2:43-48, 2º sem. 1982.

Proposta para um curso de metodologia do ensino específico para a área de Engenharia. O curso é essencialmente aplicado e discute as metodologias usuais na área bem como outras metodologias de ensino que poderiam encontrar aplicação na Engenharia. Entretanto, o seu objetivo principal é obter um reposicionamento do professor face a disciplina que leciona dentro do contexto curricular, e não apenas um acrescentamento de técnicas didáticas àquelas que já utiliza. São relatados os resultados da aplicação do curso em dois centros de ensino de Engenharia, sendo o primeiro situado em uma universidade federal de médio porte (UFPb, João Pessoa) e o segundo em uma escola isolada de uma universidade estadual de grande porte (EESC/CETEPE/USP).

Ensino de Engenharia. Metodologia (experiência).

FISCHER, Tania & CALÔBA, Luiz P. Course of teaching methodology in engineering: an experiment. *Rev. Ensino Eng.*, S. Paulo, 2:43-48, 2. sem. 1982.

Proposal for a course on learning methodology specifically to the area of engineering. The course is essentially applied and discusses the usual methodologies in the area as well as other methodologies which could be useful in engineering. However, the main objective is to obtain a new position for the professor within the course he teaches in the curricular context, and not only to improve his didactic techniques. The results of the application of the course in two engineering schools – a medium size federal university (Universidade Federal da Paraíba, UFPb, João Pessoa) and an isolated engineering school of a large state university (Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, EESC/CETEPE/USP), are presented.

Teaching methodology. Engineering.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Por que um curso de metodologia de ensino de engenharia?

Adota-se como pressuposto básico que cada área do conhecimento apresenta natureza e estrutura próprias decorrentes da evolução da ciência e da tecnologia. Para King e Brownell (1976) da natureza e estrutura de cada campo emergem direções metodológicas que conferem especificidade dos atos de ensinar e aprender. Neste sentido, crê-se que cada área deve criar e fortalecer as metodologias de ensino que lhes sejam peculiares. Assim sendo, acredita-se que as estratégias de desenvolvimento docente utilizadas na capacitação de professores de engenharia deverão respeitar a característica básica da área, qual seja, ser uma área essencialmente aplicada onde a tarefa do engenheiro é, sobretudo, a identificação, modelagem e solução de problemas.

### 1.2 Engenharia e Ensino de Engenharia

O procedimento usual em Engenharia é, a partir do fenômeno a ser estudado, criar um modelo para o mesmo e resolver este modelo usando um procedimento técnico-matemático. Verifica-se, então, que o ensino de Engenharia envolve pelo menos dois enfoques distintos: o primeiro é a aquisição do ferramental técnico-matemático formal e dedutivo, que é usado

\* Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

\*\* Coordenação de Programa de Pós-Graduação em Engenharia. COPPE/UFRJ.