

## A RELEVANCIA DO ESTUDO PRÁTICO DA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE EM DIFERENTES CASOS.

**Resumo:** A transferência de massa é a base de muitos processos químicos e dos vários processos físicos, como os de separação, por exemplo. Um dos mecanismos pelo qual a transferência de massa ocorre é chamado difusão. Difusão é a tendência de moléculas se movimentarem a fim de estabelecer um equilíbrio entre as concentrações. Uma das grandezas que caracteriza a transferência de massa por difusão é a difusividade mássica. Dentre as diversas operações realizadas na indústria, as que envolvem transferência de massa são bastante comuns, por isso, conhecer as propriedades de transporte das substâncias torna-se muito importante, e entre essas propriedades podemos citar a difusividade mássica. O conhecimento não é construído apenas teoricamente, bem como, também não é formado apenas na prática. Diante deste contexto fica claro que, a teoria e a prática têm importâncias fundamentais. Valores de difusividade mássica são encontrados em literatura, porém, não existe valor tabelado para todos os casos. É importante que um aluno de engenharia saiba como chegar nesses valores para que, quando questionado, possa realizar os cálculos pertinentes. Este artigo traz uma visão da realização de quatro trabalhos práticos que realizaram estudos para chegar em valores de difusividade mássica em diferentes casos do cotidiano. Estes trabalhos obtiveram valores bem próximos aos encontrados na literatura, além de um valor que, até o momento, não foi encontrado pelos autores deste artigo em outras fontes. Concluiu-se que estas práticas foram extremamente fundamentais para os alunos tanto em âmbito didático, ou seja, facilitou a compreensão da matéria, quanto para o desenvolvimento da escrita. Foi observado também que, a partir dessas práticas os alunos tiveram que desenvolver senso crítico e pensamento científico, eles consideraram os erros possíveis e criaram hipóteses bastante aceitáveis para os problemas enfrentados e resultados fora do padrão.

**Palavras-chave:** Coeficiente de difusão, difusão, difusividade mássica, transferência de massa.

### 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Delgado (2004), a transferência de massa é a base de muitos processos (químicos) e dos vários subjacentes processos de separação, onde um ou mais componentes migram dentro de uma fase ou de uma fase para outra, através da interface. A transferência de massa exige a presença de duas regiões com diferentes composições químicas e refere-se ao movimento da espécie química a partir da região de concentração mais elevada em direção à região de menor concentração (ÇENGEL; GHAJAR, 2011). Essa transferência pode ocorrer pelo mecanismo da difusão molecular ou da convecção (INCROPERA, 2002)

A difusão representa a tendência de as moléculas migrarem de uma região de alta concentração para uma região de baixa concentração. No final do processo, a concentração tende a se igualar em todos os pontos do sistema e, nesse caso, pode-se dizer que ocorreu uma transferência de massa ocasionada pelo gradiente de concentração. Observa-se desse enunciado uma nítida relação entre causa e efeito. Para causa: diferença de concentração do soluto existe o efeito da transferência de massa. A diferença de concentração do soluto, enquanto causa, traduz-se em “força motriz” necessária ao movimento da espécie considerada de uma região a outra. (CREMASCO, 1998).

Uma das grandezas que distingue a transferência de massa por difusão da transferência de massa por outros mecanismos é a difusividade mássica ( $D_{AB}$ ), que pode ser definida, rusticamente como a velocidade com a qual uma espécie difunde na outra (VEIT, 2010).

Nas indústrias existem inúmeras operações que envolvem a transferência de massa por difusão, as mais comuns são a destilação, secagem, extração e outras, portanto, torna-se necessário conhecer as propriedades de transporte das substâncias, dentre estas a difusividade mássica (VEIT, 2010).

O conhecimento não é construído apenas teoricamente, bem como, também não é formado apenas na prática. Diante deste contexto fica claro que, a teoria e a prática têm importâncias fundamentais. Ao conhecer a fundamentação teórica de determinada matéria, cultivamos inúmeros pontos de vista de variados autores, sendo assim, adquirimos perspectivas para que sejamos capazes de julgar e compreender diversas situações. Relacionando este saber teórico para a prática tornamos isso menos abstrato, facilitando a compreensão e enriquecemos a capacidade do aluno de lidar com situações, pois, a formação discente depende tanto das teorias, quanto das práticas desenvolvidas na vida escolar.

Para tanto, a realização de práticas que visam ensinar como o coeficiente de difusividade mássica é determinado são extremamente importantes para melhor compreensão da matéria, bem como para o desenvolvimento de habilidades e pensamento científico. Baseado no exposto, quatro grupos de alunos demonstraram o processo da determinação do coeficiente de difusão experimentalmente através de quatro casos diferentes.

## 2 METODOLOGIA

A relação entre a teoria e a prática foi proposta através da realização de trabalhos cujos objetivos eram determinar experimentalmente o coeficiente de difusividade estudado na disciplina de transferência de massa. Com a finalidade de avaliar a eficácia da relação entre a teoria e a prática serão expostos os métodos e os resultados obtidos por cada grupo.

Para fins didáticos, a partir deste ponto citaremos os trabalhos de acordo com os casos estudados. Sendo: **GRUPO 1** – Cálculo do coeficiente de difusividade baseado na transferência de massa pela secagem da banana prata; **GRUPO 2** – Cálculo do coeficiente de difusividade do dióxido de carbono em película de borracha; **GRUPO 3** – Cálculo do coeficiente de difusividade de uma solução de cloreto de sódio em diferentes concentrações e **GRUPO 4** – Cálculo do coeficiente de difusão da gasolina em concreto.

## 2.1 Metodologia GRUPO 1

As bananas foram cortadas em rodela finas, aproximadamente 1mm, e colocadas em 4 (quatro) placas de petri, que foram previamente pesadas. Os conjuntos individuais, formados pela placa e as fatias de bananas, foram então pesados, obtendo-se as massas iniciais da fruta através da diferença entre a massa do conjunto e a massa das placas vazias.

As quatro placas foram colocadas em uma assadeira redonda que foi levada à estufa em uma temperatura controlada de 75°C, esta foi a temperatura durante todo o experimento. Os conjuntos foram pesados, individualmente, em intervalos regulares de 8 minutos, até serem obtidos valores constantes de massa. O experimento durou 120 minutos.

## 2.2 Metodologia GRUPO 2

O experimento consiste em encher uma bexiga de balão de gás carbônico. Para produzir esse gás puro, para tal, reagiu-se bicarbonato de sódio com vinagre conforme a reação a seguir:



Antes de começar o experimento, pesou-se o balão vazio e registou-se sua massa. O experimento consistiu em pesar 42 gramas de bicarbonato e transferi-lo para dentro de um balão com o auxílio de um funil. Mediu-se 350 ml de vinagre e transferi-o para dentro da garrafa PET de dois litros. Encaixou-se o balão na boca da garrafa que continha o vinagre, transferindo o bicarbonato lentamente para dentro da garrafa. A reação é instantânea e dentro de poucos segundos o balão estava cheio de gás carbônico.

Após encher o balão de gás, ele foi retirado da garrafa cuidadosamente e amarrado. Pesou-se a massa e mediu-se o diâmetro registrando-os em uma tabela com o tempo inicial igual a zero. Esse procedimento de registrar o diâmetro e massa foi repetido de 5 em 5 minutos durante 125 minutos (duas horas e 5 minutos).

## 2.3 Metodologia GRUPO 3

A metodologia para esse experimento foi baseada no experimento número 5 do Manual Of Chemical Engineering Laboratory I (2009) da Universiti Tunku Abdul Rahman (UTAR).

## 2.4 Metodologia GRUPO 4

Para a realização do experimento foi necessário, primeiramente, fazer uma placa de cimento com areia, representando o material de construção em que se deseja analisar o coeficiente de difusão do composto orgânico volátil (COV), que serviu como a “tampa” do copo de alumínio que compôs o sistema Copo Úmido. Foi utilizado como COV 20 mL de gasolina comum, cuja densidade foi aferida em um picnômetro.

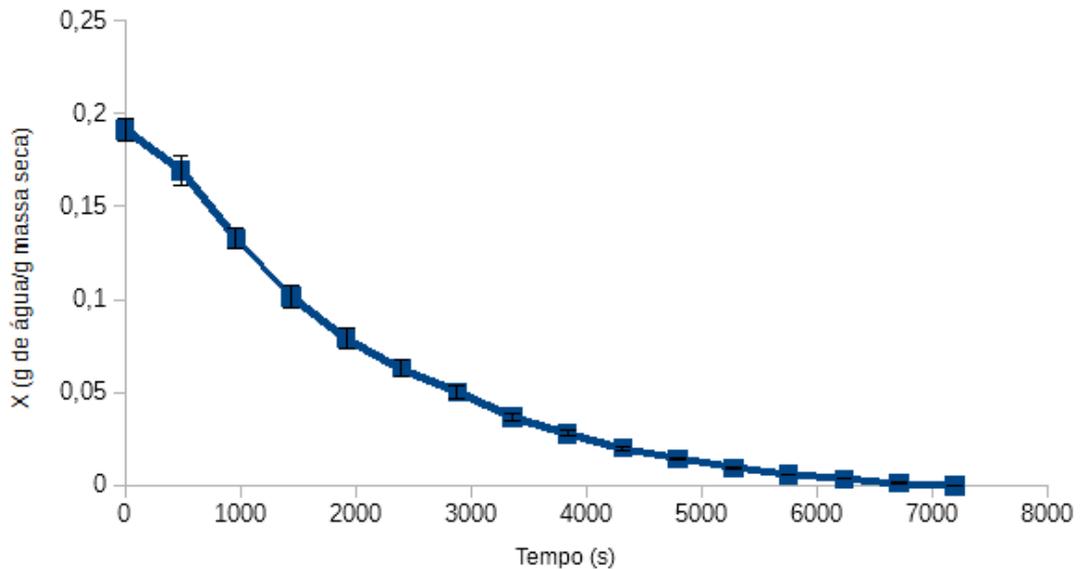
O volume de gasolina foi então transferido para o copo e o sistema foi vedado utilizando silicone e fita isolante. De posse desse sistema devidamente montado foi necessário a utilização de uma balança analítica para que as massas dos mesmos fossem verificadas com o passar do tempo e, assim, obter dados necessários para o cálculo do coeficiente de difusão desejado.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Resultados e discussões GRUPO 1

A partir dos dados obtidos no experimento realizado construiu-se uma curva relacionando o teor de água contida na banana prata e o tempo de secagem, de acordo com a Figura 2. Observa-se uma boa consistência dos dados, baixo desvio dos pontos em relação à média.

Figura 1 Variação da umidade da banana prata em função do tempo de secagem à 75°C.



Utilizando os dados e as informações da curva de secagem obtida, determinou-se valores necessários para a posterior obtenção do coeficiente de difusividade. Sendo assim, o valor estimado para o coeficiente de difusividade foi igual a  $D_{ab} = 2,956775 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Este valor encontra-se em concordância com dados encontrados na literatura. Silva, et. al. 2010, por exemplo, determinou o valor de difusividade da banana igual a  $D_{eff} = 4,567 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Deve ficar claro que o aumento do número de termos poderia aumentar a qualidade dos valores ajustados pelo modelo de Cranck, porém exigiriam maiores esforços matemáticos e consequentemente softwares mais sofisticados.

Para a solução da equação diferencial proposta por Cranck, assim como em Silva, et. al. 2010, é proposto que as fatias de bananas são cilindros infinitos, com comprimento muito superior à espessura. Além disso, considera-se que o  $D_{ab}$  seja constante, o que não ocorre na realidade, já que este é uma função do teor de umidade, que varia com o tempo. Assim, esses fatores podem configurar entre as possíveis fontes de erro do experimento.

### 3.2 Resultados e discussões GRUPO 2

Os experimentos para determinar a difusão de uma substância em outra normalmente são muito complexos e exigem um cálculo matemático avançado. Para adaptar o experimento à matemática desenvolvida na graduação, foi necessário fazer algumas considerações.

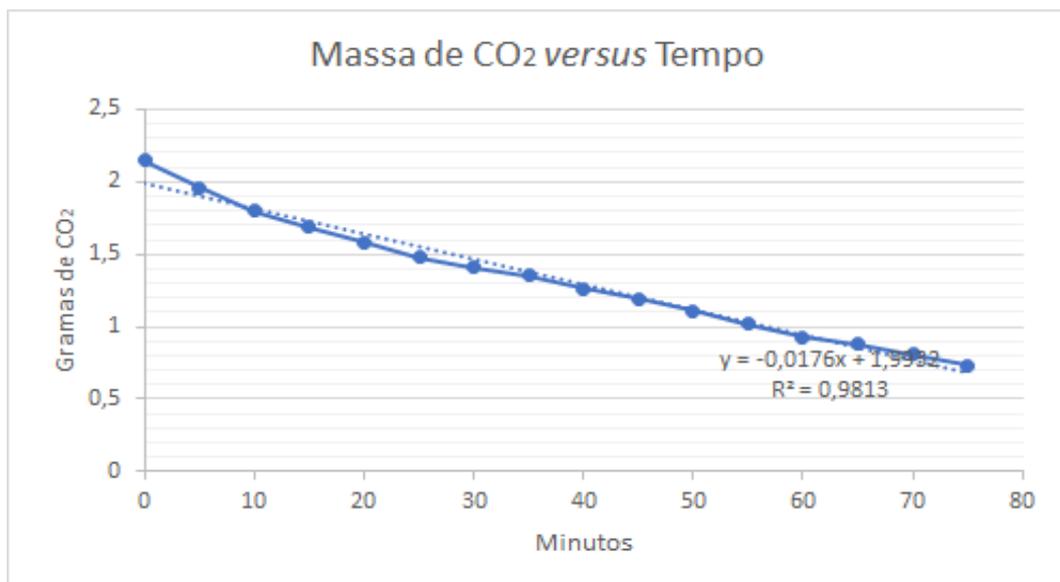
Admitindo essas considerações, com a primeira pesagem da borracha contendo gás carbônico, foi obtida a massa inicial (m) de 2,15 gramas do gás formado. Conhecendo-se a Massa Molar (MM) do gás carbônico, 44,01 gramas/mol, foi possível determinar o número de mol (n) de gás carbônico no interior da borracha sendo de 0,04885 mol.

Em posse do número de mol de gás carbônico, foi possível determinar a pressão inicial ( $P_0$ ) de gás no interior da borracha. A temperatura ambiente (T) 23,5°C no início do experimento e foi medido a circunferência inicial da borracha para determinação do volume inicial ( $V_0$ ) de 0,00406 m<sup>3</sup>. A pressão inicial ( $P_0$ ) pode ser calculada através da equação de gás ideal, obtendo-se, então, um valor de pressão inicial igual a  $P_0 = 29660,15$  Pa.

De forma análoga, podemos calcular a concentração inicial de gás carbônico no interior da borracha utilizando o valor de pressão inicial ( $P_0$ ) calculada e manipulando a equação de gás ideal. Sendo assim,  $Ca_0 = 12,03$  mol.m<sup>-3</sup>.

Utilizando os valores experimentais obtidos com o decaimento da massa da borracha com o gás carbônico em relação ao tempo foi possível determinar, por meio de uma regressão linear, o fluxo molar ( $N''$ ) de gás carbônico através da película de borracha. Os cálculos para determinação do fluxo foram realizados numa planilha do Excel®, a partir da qual foi gerado o seguinte gráfico.

Figura 2 Regressão linear e gráfico obtido a partir da difusão.



Com a regressão linear, foi aferido o comportamento de decaimento constante de massa devido à difusão, resultando em um valor de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,9813. Dessa forma, foi possível caracterizar o experimento como regime permanente.

O fluxo molar ( $N_{a,r}$ ) de gás carbônico, calculado pela variação da massa pela variação do tempo, foi de 0,0183 mol/hora, ou 0,000050989 mol/s.

Para se obter a equação para o cálculo do coeficiente de difusividade ( $D_{ab}$ ) experimental, foi necessário manipular a equação da Lei de Fick. Realizando os algebrismos e cálculos pertinentes para obtenção de variáveis necessárias chegou-se a um valor de coeficiente de difusividade experimental e ajustado para uma temperatura de 20°C e pressão atmosférica de 1 atm de  $D_{ab} = 8,369 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , já o teórico obtido na literatura foi de  $D_{ab} = 1,1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pode-se perceber quão próximo são os valores ao se analisar o erro experimental calculado. O valor de coeficiente de difusividade teórico e experimental diferem entre si somente 23,92%. Assim, é notável a qualidade do experimento em virtude de um erro experimental relativamente baixo.

### 3.3 Resultados e discussões GRUPO 3

A partir de gráficos plotados para obtenção de dados, foi observado que o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) apresenta uma tendência a diminuir com a queda da concentração de NaCl. Isso se explica pelo fato da baixa precisão do condutivímetro, que, em casos de baixa concentração, onde a leitura feita pelo equipamento varia muito pouco e se torna imprecisa.

É importante ressaltar que, os experimentos conduzidos às concentrações molares de 0,5 mol L<sup>-1</sup>, 0,25 mol L<sup>-1</sup> e 0,125 mol L<sup>-1</sup> foram realizadas em função de intervalos de tempo maiores que aqueles realizados nas concentrações de 2 mol L<sup>-1</sup> e 1 mol L<sup>-1</sup>, a fim de permitir uma melhor leitura pelo equipamento e minimizar os erros experimentais.

Após o cálculo das variáveis necessárias foram determinados os coeficientes de difusividade e para fins de comparação com os dados experimentais, montou-se a Tabela 1 com os dados de coeficiente de difusão encontrados na literatura experimentalmente.

Tabela 1 Coeficientes de difusão teóricos e experimentais de soluções de NaCl.

Temperatura, (K)	Concentração, (mol L <sup>-1</sup> )	$D_{AB}$ Experimental, (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ) x10 <sup>9</sup>	$D_{AB}$ Teórico, (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ) x10 <sup>9</sup>
297 ± 0,5	2,000 ± 0,020	1,659 ± 0,027	1,504
297 ± 0,5	1,000 ± 0,010	1,458 ± 0,036	1,285
295 ± 0,5	0,500 ± 0,005	1,410 ± 0,035	1,447
292 ± 0,5	0,2500 ± 0,0025	1,206 ± 0,044	1,423
294 ± 0,5	0,1250 ± 0,0013	1,342 ± 0,077	1,450

Afim de avaliar o grau de veracidade dos dados encontrados experimentalmente montou-se uma Tabela 2 com os erros relativos e incertezas associadas referentes aos coeficientes de difusão calculados para cada concentração da solução de NaCl.

Tabela 2 Erros relativos e incertezas associadas referentes aos coeficientes de difusão calculados para cada concentração da solução de NaCl.

Concentração, (mol L <sup>-1</sup> )	Erro relativo, (%)
2,000 ± 0,020	10,260 ± 1,791
1,000 ± 0,010	13,360 ± 2,818
0,500 ± 0,005	2,617 ± 2,435
0,2500 ± 0,0025	15,270 ± 3,092
0,1250 ± 0,0013	7,532 ± 5,282

Nota-se na Tabela 2 que de uma forma geral, tem-se que os valores de erro foram menores que 20%, o que representa, nesse caso, um valor baixo, em se tratando da rusticidade do experimento. Ainda assim, é possível correlacioná-lo a algumas prováveis fontes.

Primeiramente, é possível que tenha ocorrido a formação de bolhas de ar dentro da célula de difusão (tubo em U), obstruindo os capilares e dificultando a difusão da solução de cloreto de sódio para o vaso de difusão. Houve imprecisão no momento de se iniciar e parar a medição de tempo no cronômetro, devido ao tempo de reação humana. Além disso, é possível que os equipamentos não estivessem suficientemente limpos. A limpeza de equipamentos e materiais em experimentos baseados em medidas de condutividade é de crucial importância, visto que resíduos ou impurezas presentes podem ocasionar medições equivocadas pelo aparelho.

Também, como visto anteriormente, algumas medidas de condutividade sofreram variações tão pequenas que não puderam ser mensuradas com alta acurácia. Por fim, assumiu-se que a temperatura da solução permaneceu constante ao longo do experimento. Porém, isso pode não ser verdade, visto que a montagem experimental estava exposta às vizinhanças.

### 3.4 Resultados e discussões GRUPO 4

O experimento realizado para determinação da temperatura de ebulição possibilitou observar um colar de bolhas bem definido na faixa de 65,0 °C a 79,0 °. Segundo Perry (1997), a temperatura do etanol, um dos componentes da gasolina, é, em 1 atm, 78,4 °C, o que, portanto, permite considerá-lo como composto principal da gasolina analisada. De posse dessa temperatura, da pressão atmosférica padrão de **1,01325 bar** e da média das temperaturas ambientes nos dias dos experimentos (21,0 °C) é possível calcular a pressão de vapor do etanol sendo igual a 2394,08866 Pa ou 0,02391 bar.

Com essa pressão de vapor calculada e utilizando como constante universal dos gases é possível, então, calcular a concentração de etanol no experimento como sendo  $C_{A1} = 0,978897$  mol. m<sup>-3</sup>. A área (S) do copo úmido, sabendo que o diâmetro (D) da placa é 0.055 m será igual a  $S = 0,0023758$  m<sup>2</sup>

Já o caudal mássico difundido através do material ( $\dot{m}$ ), que é obtido pelo declive da curva de perda de massa ao longo do tempo, pode ser obtido plotando os dados da Tabela 3 abaixo, cujos dados foram obtidos pesando as massas do sistema ao longo dos dias.

Tabela 3 Valores de massa ao longo do tempo determinados experimentalmente

Dia	Massa conjunto (Kg)	Massa gasolina (Kg)	Tempo decorrido (s)	Vazão mássica (Kg/s)	Vazão molar (mol/s)
02/jun	0.2105169	0.0148569	-	-	-
06/jun	0.2061806	0.0105206	14400	7.31E-07	1.59E-05
07/jun	0.2056032	0.0099432	3600	2.76E-06	6.00E-05
08/jun	0.2048797	0.0092197	3600	2.56E-06	5.56E-05
09/jun	0.2040358	0.0083758	3600	2.33E-06	5.05E-05
12/jun	0.2023045	0.0066445	10800	6.15E-07	1.34E-05
13/jun	0.20192	0.00626	3600	1.74E-06	3.77E-05
14/jun	0.2014055	0.0057455	3600	1.60E-06	3.46E-05

A vazão molar é obtida a partir da massa molar do etanol ( $C_2H_6O$ ) que é 0.04606844 kg/mol. A partir obtém-se um gráfico das vazões molares de cada dia onde encontra-se um coeficiente angular de  $5 \cdot 10^{-6}$  que é exatamente o valor de  $\dot{m}$  necessário cálculo do  $D_{AB}$ .

Dessa forma, o valor do coeficiente de difusão ( $D_{AB}$ ) aproximado da gasolina no material de construção (cimento com areia), é  $D_{AB} = 4,2998 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$ . Não foi possível encontrar um valor exato para fins comparativos da difusividade. Porém, encontrou-se o coeficiente de difusão de dois dos possíveis compostos na mistura (n-octano e m-xileno) em cimento *Guindeira*. Procurando-se a temperatura de ebulição dos mesmos, encontrou-se que são, a 1 atm, respectivamente, 126,6 °C e 139,3 °C, segundo Perry (1997). Esses valores destoam significativamente do ponto de ebulição do etanol, o qual foi utilizado para o cálculo da pressão de vapor da gasolina, tornando esses valores inapropriados para obtenção de valores de erro percentual.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível concluir a partir dos resultados expostos em todos os casos que os experimentos realizados e as metodologias empregadas foram satisfatórias, tornando possível determinar o coeficiente de difusividade em todos os quatro casos com erros relativamente pequenos em virtude das aproximações e considerações realizadas.

Todos os grupos realizaram cálculo de incertezas para verificação de propagação dos erros a partir do software Engineering Equation Solver (EES), isso é uma evidência de que os alunos levaram em consideração que a realização deste cálculo na prática é necessário para ajustar os valores obtidos e verificar qual variável teve maior responsabilidade no desvio em relação a valores encontrado na literatura.

Com base nas discussões dos erros, nota-se que os alunos consideraram que é possível tornar o experimento ainda mais preciso, empregando-se modificações tanto nos equipamentos quanto nos aparatos experimentais e, conseqüentemente, minimizando-se os erros experimentais.

Todos os grupos utilizaram perfeitamente o conhecimento teórico para realizar manipulações algébricas em fórmulas bem como para fazer considerações a fim de ajustar o conhecimento científico para cada caso proposto.

Portanto, podemos afirmar que a relação entre a teoria e a prática foi estabelecida através da realização desses trabalhos cujos objetivos eram determinar experimentalmente o coeficiente de difusividade estudado na disciplina de transferência de massa.

#### 5 REFERÊNCIAS

CREMASCO, Marco Aurélio. **Fundamentos de Transferência de Massa**. 2ª Edição. Campinas, SP: editora da Unicamp 2002.

ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4ª ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2011.

DCE - DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING. UEMK2411 **Chemical Engineering Laboratory I Manual**. Faculty of Engineering and Science (FES), Universiti Tunku Abdul Rahman, Sungai Campus, 2009.

DELGADO, H. **Transferência de oxigênio em dispersões aquoso-orgânico**, Instituto Politécnico de Tomar – Escola Superior de Tecnologia Tomar, 2004.

INCROPERA, F.P.; WITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, 5. ed. New York: J. Wiley & Sons, 2002.

SILVA, C. M. D. P. S.; FARIAS, V. S. O.; NASCIMENTO, P. L.; SILVA, W. P.; GOMES, J. P.; LINS, M. A. A. **Determinação simultânea da difusividade efetiva e do coeficiente de transferência convectivo de massa durante a secagem de bananas inteiras usando soluções analíticas e o método inverso**. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010, Campina Grande – Paraíba.

PERRY, H. R. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7. Ed. Estados Unidos da América: McGraw-Hill, 1997.

## **THE RELEVANCE OF THE PRACTICAL STUDY OF THE DETERMINATION OF THE DIFFUSIVITY COEFFICIENT IN DIFFERENT CASES.**

**Abstract:** *The mass transfer is the basis of many chemical processes and of various physical processes, such as separation processes, for example. One of the mechanisms by which mass transfer occurs is called diffusion. Diffusion is the tendency for molecules to move in order to establish a balance between concentrations. One of the great features that characterizes the mass transfer by diffusion is the mass diffusivity. Among the several operations performed in the industry, those involving mass transfer are quite common, so knowing the transport properties of the substances becomes very important, and among these properties we can mention the mass diffusivity. Knowledge is not built only theoretically, nor is it formed in practice. In this context, it is clear that theory and practice have fundamental importance. Mass diffusivity values are found in the literature, however, there is no tabulated value for all cases. It is important for an engineering student to know how to arrive at these values so that, when questioned, he or she can perform the relevant calculations. This article presents a vision of the accomplishment of four practical work that carried out studies to arrive at values of mass diffusivity in different cases of daily life. These studies obtained values very close to those found in the literature, besides a value that, to date, was not found by the authors of this article in other sources. It was concluded that these practices were extremely fundamental for students both in didactic context, that is, facilitated the understanding of the subject, as well as for the development of writing. It was also observed that from these practices the students had to develop critical sense and scientific thinking, they considered the possible errors and created quite acceptable hypotheses for the problems faced and nonstandard results.*

**Key-words:** *Coefficient of diffusion, diffusion, mass diffusivity, mass transfer.*