



DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE DO SISTEMA CLOROFÓRMIO-AR UTILIZANDO A CÉLULA DE ARNOLD

Wesley Thölken¹; Rodrigo Geremias¹; Evandro Balestrin¹

¹Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC), Videira, Santa Catarina, Brasil
wesleytholken@outlook.com

Palavras-Chave: transferência de massa, difusão molecular, célula de Arnold.

Introdução

A transferência de massa consiste no transporte de espécies químicas no interior de um sistema, podendo ocorrer por mecanismos difusivos e convectivos (Cremasco, 2015; Bergman; Lavine, 2019). Segundo Çengel e Ghajar (2012), esse fenômeno promove o deslocamento de matéria entre diferentes regiões em decorrência da existência de gradientes que atuam como força motriz para o transporte. Nesse contexto, Cremasco (2019) define a difusão como um processo de transporte molecular resultante da movimentação aleatória das moléculas, no qual ocorre a migração de espécies químicas de regiões com maior concentração para regiões com menor concentração. Esse mecanismo está presente em diversas operações unitárias, como adsorção, absorção, secagem e destilação.

A descrição matemática da difusão é fundamentada nas Leis de Fick. Conforme Welty, Rorrer e Foster, (2017) a primeira lei de Fick estabelece que o fluxo difusivo é proporcional ao gradiente de concentração existente no sistema, sendo o coeficiente de proporcionalidade denominado coeficiente de difusão ou difusividade binária (D_{AB}). Em condições estacionárias, o perfil de concentração permanece constante com o tempo, embora exista transporte de massa devido à presença do gradiente de concentração. Dessa forma, a difusividade representa uma propriedade característica do sistema, dependente das espécies envolvidas, do meio de transporte e das condições de operação.

A determinação da difusividade apresenta caráter predominantemente experimental, pois seu valor depende das propriedades físicas do sistema e das condições operacionais empregadas. Conforme Bergman e Lavine (2019), em misturas gasosas, esse parâmetro tende a aumentar com a elevação da temperatura e diminuir com o aumento da pressão, devido às alterações na mobilidade molecular. Em sistemas líquidos e sólidos, a determinação da difusividade torna-se mais complexa em razão da maior resistência ao movimento molecular e da dificuldade de obtenção de modelos gerais de previsão. Para misturas gasosas, Cremasco (2019) apresenta diferentes métodos de estimativa desse coeficiente, incluindo a teoria cinética dos gases, a equação de Chapman-Enskog, a correlação de Wilke-Lee e a correlação empírica de Fuller, Schettler e Giddings.

Como alternativa experimental para sistemas gasosos, Welty, Rorrer e Foster (2017), descrevem a célula de difusão de Arnold, cujo princípio baseia-se na difusão de um vapor através de um gás estagnado. Nesse método, um líquido volátil presente no interior de um tubo evapora e se difunde através da camada gasosa acima da superfície líquida, provocando a redução da altura da coluna ao longo do tempo. A integração da Primeira Lei de Fick aplicada

ao transporte de massa em regime quase estacionário permite relacionar a variação da altura da coluna líquida com as propriedades físicas do sistema, possibilitando a determinação experimental do coeficiente de difusão binária, conforme apresentado na Equação 1.

$$D_{AB} = \frac{\rho_A(Z_f^2 - Z_0^2)}{2M_A C \Delta t \ln\left(\frac{1 - y_{A2}}{1 - y_{A1}}\right)} \quad (1)$$

em que D_{AB} representa a difusividade binária do sistema; ρ_A , a densidade do líquido evaporante; M_A , a massa molar do componente A; C , a concentração molar total da fase gasosa; y_{A1} e y_{A2} , as frações molares de A nas posições inicial e final da coluna de difusão; e Z_0 e Z_f , as alturas da coluna líquida nos instantes inicial e final, respectivamente.

Diante da importância da determinação experimental da difusividade para a análise dos fenômenos de transferência de massa, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o processo de difusão molecular do clorofórmio no ar por meio da célula de difusão de Arnold, determinando experimentalmente o coeficiente de difusão binária do sistema clorofórmio-ar. Para isso, foram analisadas as variações da altura da coluna líquida de clorofórmio ao longo do tempo, considerando as condições experimentais estabelecidas, com o propósito de obter a difusividade do par estudado.

Material e Métodos

A metodologia experimental consistiu na montagem da célula de difusão de Arnold para determinação da difusividade do sistema clorofórmio-ar, conforme apresentado na Figura 1. Inicialmente, o tubo de ensaio foi graduado com papel milimetrado para permitir o acompanhamento da variação da altura da coluna líquida durante o experimento. Posteriormente, foi adicionada sílica gel na entrada do tubo de PVC com a finalidade de reduzir a umidade do ar presente no sistema e minimizar possíveis interferências associadas à presença de vapor de água.

Figura 1 - Célula de difusão de Arnold utilizada na determinação experimental.



Fonte: elaborado pelo autor (2026)



O clorofórmio foi disposto no interior do tubo de ensaio, sendo o conjunto fixado em um suporte por meio de uma garra. A temperatura do sistema foi monitorada por um termômetro inserido no aparato, mantendo-se aproximadamente constante durante a realização do ensaio. Uma corrente de ar de baixa intensidade foi gerada por um secador operando em potência mínima, promovendo a renovação do ar na extremidade superior da célula e a remoção do vapor de clorofórmio difundido. A altura inicial da coluna líquida foi registrada como referência para as medições posteriores, e as variações da altura do líquido foram determinadas em intervalos de 10 minutos durante um período total de 2 horas.

A determinação da difusividade foi realizada considerando o transporte de massa unidimensional do vapor de clorofórmio através do ar estagnado no interior da célula. O tratamento matemático foi baseado na aplicação da Primeira Lei de Fick em regime estacionário e sem reação química, considerando o ar como componente sem fluxo líquido no processo difusivo. A partir da relação entre a redução da altura da coluna de clorofórmio e o tempo de experimento, juntamente com os parâmetros de temperatura, pressão atmosférica, pressão de vapor e propriedades físicas do composto, foi calculado o coeficiente de difusão do sistema clorofórmio-ar.

Resultados e Discussão

Os resultados experimentais referentes ao acompanhamento da temperatura do sistema e do deslocamento da coluna líquida durante a operação da célula de Arnold são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros experimentais obtidos durante a operação da célula de Arnold

Parâmetro	Inicial	Final	Variação
Temperatura (°C)	19	30	+11
Deslocamento (mm)	60	47	-13

Fonte: elaborado pelo autor (2026)

Durante o ensaio, observou-se um aumento da temperatura do sistema de 19 °C para 30 °C, correspondente a uma variação de 11 °C. Esse comportamento está associado ao aquecimento inicial da célula até atingir uma condição próxima à estabilidade térmica. Simultaneamente, foi verificada a redução da altura da coluna líquida de 60 mm para 47 mm, representando uma variação total de 13 mm.

A redução da altura da coluna líquida está relacionada à evaporação do clorofórmio na interface líquido-gás e ao transporte das moléculas através da fase gasosa por difusão molecular. Esse fenômeno caracteriza o funcionamento da célula de Arnold e permite a determinação experimental do coeficiente de difusão binária do sistema clorofórmio-ar.

A partir dos dados experimentais, foi realizado o tratamento matemático considerando a variação da altura da coluna de difusão ao longo do tempo. A pressão de vapor do clorofórmio foi determinada pela correlação de Antoine, utilizando os parâmetros da substância disponíveis na literatura e considerando a temperatura predominante de operação de 30 °C. As demais propriedades físico-químicas necessárias para o cálculo da difusividade, como massa específica e massa molar, foram obtidas em referências bibliográficas, conforme apresentado na Tabela 2.



Tabela 2 – Propriedades físico-químicas utilizados na determinação da difusividade

Parâmetro	Valor	Referência
Massa específica (g/cm ³)	1,479	Haynes (2017)
Massa molar (kg/kmol)	119,378	Haynes (2017)
Pressão de vapor a 30°C (kPa)	32,315	Green e Perry (2008)

Fonte: elaborado pelo autor (2026)

Com base nas propriedades físico-químicas e nas condições experimentais, foram determinados os parâmetros referentes à fase gasosa. A pressão atmosférica local foi utilizada no cálculo da concentração molar total do sistema por meio da equação dos gases ideais. A fração molar do clorofórmio na interface líquido-gás foi obtida pela relação entre a pressão de vapor do componente e a pressão total do sistema, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros calculados para o sistema clorofórmio-ar

Parâmetro	Valor
Pressão (kPa)	90,540
Concentração molar (kmol/m ³)	0,0359
Fração molar	0,357

Fonte: elaborado pelo autor (2026)

Com os parâmetros experimentais e as propriedades físico-químicas estabelecidas, o coeficiente de difusão binária foi determinado utilizando a equação da célula de Arnold (Equação 1). Para a resolução do modelo, foi considerada a hipótese de $y_{A2} = 0$, assumindo que a concentração de clorofórmio na extremidade superior da coluna gasosa é desprezível em comparação à concentração presente na interface líquido-gás.

Considerando a difusão das moléculas de clorofórmio através de uma fase gasosa composta por ar estagnado, foi obtido um coeficiente de difusão binária de 0,0702 cm²/s. Esse valor representa o coeficiente associado ao transporte molecular do componente volátil através da fase gasosa sob as condições experimentais avaliadas.

A magnitude do coeficiente de difusão obtido está associada às condições operacionais do sistema, especialmente à temperatura, à pressão total, à pressão de vapor do clorofórmio e à variação do comprimento da coluna de difusão. Embora tenha sido observada uma variação de temperatura durante o ensaio, o cálculo foi realizado considerando a temperatura predominante de 30 °C, correspondente ao período em que o sistema permaneceu na condição mais estável. Essa consideração representa uma simplificação do modelo, uma vez que a difusividade e a pressão de vapor apresentam dependência com a temperatura, porém é necessária para a aplicação da equação da célula de Arnold, que assume propriedades físicas constantes durante o processo difusivo.

De acordo com Bergman e Lavine (2019), a difusividade em sistemas gasosos é influenciada pela temperatura e pela pressão, devido às alterações na mobilidade molecular das espécies envolvidas. Dessa forma, o aumento da temperatura observado durante o experimento contribuiu para a elevação da pressão de vapor do clorofórmio, favorecendo sua evaporação na interface líquido-gás e intensificando o transporte molecular através da fase gasosa.



Em relação aos dados reportados na literatura, Eklund e Rago (2024) apresentam o valor de $0,0769 \text{ cm}^2/\text{s}$ para a difusividade do sistema clorofórmio-ar em condições semelhantes às empregadas neste estudo. Comparando esse valor com o resultado experimental obtido, foi observado um erro relativo de 8,71%, indicando concordância satisfatória entre os valores.

Segundo Buchmann e Sarkis (2002), a avaliação da qualidade de resultados experimentais deve considerar as incertezas associadas às etapas de medição, ao tratamento matemático dos dados e às condições operacionais empregadas. Nesse contexto, a diferença observada pode estar relacionada às limitações inerentes ao procedimento experimental, como a determinação da posição da coluna líquida, variações de temperatura e as simplificações introduzidas pelo modelo matemático.

Além disso, a consideração de difusão unidimensional em uma fase gasosa estagnada e a hipótese de concentração desprezível de clorofórmio na extremidade superior da coluna representam aproximações necessárias para aplicação da equação da célula de Arnold, mas podem contribuir para pequenas diferenças entre o valor calculado e o comportamento real do sistema.

Dessa forma, o erro relativo inferior a 10% demonstra que a metodologia experimental e o tratamento matemático empregados apresentaram desempenho satisfatório para a determinação da difusividade do sistema clorofórmio-ar. Os resultados obtidos confirmam a aplicabilidade da célula de Arnold como ferramenta experimental para o estudo de fenômenos de transferência de massa, permitindo relacionar a variação macroscópica da altura da coluna líquida ao transporte molecular de espécies químicas em sistemas gás-vapor.

Conclusões

O presente trabalho permitiu determinar experimentalmente o coeficiente de difusão binária do sistema clorofórmio-ar utilizando a célula de Arnold, relacionando a redução da altura da coluna líquida ao transporte molecular do componente volátil através da fase gasosa. A partir das condições experimentais avaliadas, foi obtido um coeficiente de difusão de $0,0702 \text{ cm}^2/\text{s}$ considerando a hipótese de ar estagnado e concentração desprezível de clorofórmio na extremidade superior da coluna de difusão.

O resultado obtido apresentou concordância satisfatória com os dados da literatura, apresentando erro relativo de 8,71% em comparação ao valor de $0,0769 \text{ cm}^2/\text{s}$ reportado por Eklund e Rago (2024). Esse comportamento demonstra a adequação da metodologia empregada para a determinação experimental de propriedades de transporte em sistemas gás-vapor.

A variação da temperatura observada durante o ensaio pode ter influenciado o processo de transferência de massa de forma a diminuir o coeficiente de difusividade. Tendo em vista que inicialmente a difusão foi mais lenta na temperatura de 19°C até ser atingido a estabilidade em 30°C . As diferenças entre o valor experimental e o de referência ainda podem estar associadas às incertezas de medição, às variações das condições operacionais e às simplificações adotadas no modelo matemático.

Dessa forma, a célula de Arnold mostrou-se uma ferramenta adequada para a determinação da difusividade do sistema clorofórmio-ar, permitindo avaliar experimentalmente o transporte de massa por difusão molecular em sistemas gás-vapor.



Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC), ao Curso de Engenharia Química e aos colaboradores pelo apoio, pelos conhecimentos compartilhados e pelas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

BERGMAN, Theodore Louis; LAVINE, Adrienne Susan. **Incropera**: fundamentos de transferência de calor e de massa. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2019.

BUCHMANN, José Henrique; SARKIS, Jorge Eduardo de Souza. O conceito de incerteza aplicado aos processos de medição associados à preparação de uma solução de referência para calibração. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 111-116, 2002. DOI: 10.1590/S0100-40422002000100019

ÇENGEL, Yunus Ali; GHAJAR, Afshin Jahanshahi. **Transferência de Calor e Massa**: uma abordagem prática. 4. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2012.

CREMASCO, Marco Aurélio. **Fundamentos de transferência de massa**. 3. ed. São Paulo, SP: Blucher, 2015.

CREMASCO, Marco Aurélio. **Difusão mássica**. São Paulo, SP: Blucher, 2019.

EKLUND, Bart; RAGO, Rich. Fate and Transport of Chloroform in VI Evaluations. **Remediation Journal**, v. 34, n. 4, e21786, 2024. DOI: 10.1002/rem.21786

GREEN, Donald William; PERRY, Robert Henry. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2008.

HAYNES, William Monroe (ed.). **CRC Handbook of Chemistry and Physics**: a ready-reference book of chemical and physical data. 97. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.

WELTY, J. R.; RORRER, G. L.; FOSTER, D. G. **Fundamentos de Transferência de Momento, de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2017.